

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,
ПГУАС

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова

Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 15.09.2023.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 21.5. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 361.

Дата выхода в свет 10.10.2023.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 1200 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 3(56)/2023

Содержание

Болдырев С.А., Сафьянов А.Н., Еремкин А.И.
ВКЛАД ПЕНЗЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА АРХИТЕКТУРЫ
И СТРОИТЕЛЬСТВА В РАЗВИТИЕ РЕГИОНА...5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 13

Королев Е.В., Беленцов Ю.А.
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОГО
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ 13

Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО
ИЗ ЦИТРОГИПСА 29

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ 43

Макридин Н.И., Максимова И.Н.
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ
ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ
КОМПОЗИТОВ 49

Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ТРЕЩИНЫ В ЛАКОКРАСОЧНОМ ПОКРЫТИИ 61

**Шорстова Е.С., Ключев А.В.,
Ключев С.В., Гарькина И.А.**
ТОНКОМОЛОТЫЙ ОТСЕВ ДРОБЛЕНИЯ
КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА
В ФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ
ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ 69

**Логанина В.И., Жегера К.В.,
Лавров И.Ю., Живаев А.А.**
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ
ОБРАБОТКИ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ 77

Ветренко Т.Г., Чеснокова Т.В., Логинова С.А.
БИОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ 85

© Авторы публикаций, 2023

© Е.Г. Лапшина, Е.Н. Вечасова, дизайн обложки, 2023

© ПГУАС, 2023

Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В. ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ 91	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 152
Удодов С.А., Маштаков А.Ф., Шиян Д.В., Самандасюк Г.В., Данилов А.М. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОБОЧНОГО ФОСФОГИПСА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО ... 103	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОЙ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕЛКОПУЗЫРЧАТОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ 152
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 111	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЕЛКОПУЗЫРЧАТЫХ АЭРАТОРОВ 159
Селяев В.П., Безрукова Е.С., Бабушкина Д.Р., Грязнов С.Ю. ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ДЕГРАДАЦИИ 111	Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВОЗДУХА В ЗОНЕ ВСАСЫВАНИЯ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА 167
Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО УСИЛЕНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОНОЛИТНОГО МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА ... 122	Кузина В.В., Еремкин А.И., Кошев А.Н., Пономарева И.К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ 180
Бочарова Е.С., Селютин Л.Ф. ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОПИЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ ПОСТРОЙКИ СЕРЕДИНЫ XX ВЕКА 128	АРХИТЕКТУРА 187
Комаров В.А., Ласьков С.Н. СБОРНО-МОНОЛИТНЫЕ УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ: ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ 136	Марьёнкин А.В., Окуньков Е.А., Родин А.И. АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВИ КАЗАНСКОЙ ИКОНЫ БОЖИЕЙ МАТЕРИ С. ЧЕБЕРЧИНО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ 187
Арискин М.В., Залилов И.В. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ ШАЙБ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 144	Гречишкин А.В., Антонов А.И., Леденев В.И., Путинцева А.А. ОТРАЖЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ ШУМ НА ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ С МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКОЙ 194
	Гильдина Т.А. АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВЕЙ ГЛАЗОВСКОГО УЕЗДА ВЯТСКОЙ ГУБЕРНИИ КОНЦА XVIII – НАЧАЛА XX ВЕКА 202
	Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ ЭСТЕТИКА В ПОСТРОЙКАХ ПЭНА С.С. 211

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS 13	Alfimova N.I., Levickaya K.M., Elistratkin M.Yu. OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR MANUFACTURING A BINDING FROM CITROGYPSUM 29
Korolev E.V., Belentsov Yu.A. APPLICATION OF THE THEORY OF INFORMATION IN SOLVING PROBLEMS OF CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE 13	Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. SIMULATION MODELING OF COMPLEX SYSTEMS 43
	Makridin N.I., Maksimova I.N. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF CRITERIA FOR LONG-TERM STRENGTH OF CEMENT COMPOSITES 49

Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V. STUDY OF CRACK PROPAGATION IN PAINT COATING.....	61	Komarov V.A., Laskov S.N. PREFABRICATED MONOLITHIC JUNCTIONS OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF MULTI-STOREY BUILDINGS: FEATURES OF DEFORMATION, CRACKING AND DESTRUCTION.....	136
Shorstova E.S., Klyuev A.V., Klyuev S.V., Garkina I.A. THIN-GROUNDED QUARTZITE SANDSTONE CRUSHING SCREENING IN FIBER CONCRETE MIXTURE FOR 3D-PRINTING.....	69	Ariskin M.V., Zalilov I.V. ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR MAKING WASHERS OF WOODEN STRUCTURE CONNECTIONS.....	144
Loganina V.I., Zhegera K.V., Lavrov I.Yu., Zhivaev A.A. APPLICATION OF THE METHOD OF DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR EVALUATION OF CRACK FORMATION IN PAINT COATINGS.....	77	ENGINEERING SYSTEMS.....	152
Vetrenko T.G., Chesnokova T.V., Loginova S.A. BIOSTABILITY OF CEMENT CONSTRUCTION COMPOSITES.....	85	Andreev S.Yu., Belova L.V., Lebedinskiy K.V. METHOD OF CALCULATING THE VALUE OF SPECIFIC OXIDIZING CAPACITY OF A FINE-BUBBLED PNEUMATIC AERATION SYSTEM.....	152
Tarakanov O.V., Ivashchenko Y.G., Erofeeva I.V. THE EFFECT OF ORGANOMINERAL ADDITIVES ON THE FORMATION OF MICROSTRUCTURE AND KINETICS OF CONCRETE HARDENING AT NEGATIVE TEMPERATURES.....	91	Andreev S.Yu., Belova L.V., Lebedinskiy K.V. THEORETICAL BASIS OF CALCULATING THE PROCESS OF PNEUMATIC FINE- BUBBLE AERATORS OPERATION.....	159
Udodov S.A., Mashtakov A.F., Shiyan D.V., Samandayuk G.V., Danilov A.M. ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF BY- PRODUCT PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR OBTAINING A GYPSUM BINDING.....	103	Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A. METHODOLOGICAL BASES FOR STUDYING AIR FLOW PARAMETERS IN THE SUCTION ZONE OF THE HOOD.....	167
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	111	Kuzina V.V., Eremkin A.I., Koshev A.N., Ponomareva I.K. MATHEMATICAL MODELING OF DIFFUSIVE DISTRIBUTION OF CANDLE COMBUSTION PRODUCTS IN THE TEMPLE.....	180
Selyaev V.P., Bezrukova E.S., Babushkina D.R., Gryaznov S.Yu. ESTIMATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DURABILITY ON THE STRENGTH OF INCLINED SECTIONS BY THE METHOD OF STATISTICAL LINEARIZATION OF DEGRADATION FUNCTIONS.....	111	ARCHITECTURE.....	187
Sadenko D.S., Garkin I.N., Ariskin M.V. SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF WORKS TO STRENGTHEN THE BUILDING STRUCTURES OF A MONOLITHIC MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING.....	122	Maryonkin A.V., Okunkov E.A., Rodin A.I. ARCHITECTURE OF THE CHURCH OF THE KAZAN ICON OF THE MOTHER OF GOD IN THE VILLAGE OF CHEBERCHINO IN THE REPUBLIC OF MORDOVIA.....	187
Bocharova E.S., Selutina L.F. INFORMATION MODELING OF RAFTER SYSTEMS OF BUILDINGS CONSTRUCTED IN THE MIDDLE OF THE TWENTIETH CENTURY.....	128	Grechishkin A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I., Putintseva A.A. REFLECTED TRAFFIC NOISE IN A ADJACENT HIGHWAY AREA WITH LOW- RISE BUILDINGS.....	194
		Gildina T.A. ARCHITECTURE OF CHURCHES OF THE GLAZOV DISTRICT OF THE VYATKA PROVINCE IN THE END OF THE 18TH – BEGINNING OF THE 20TH CENTURY.....	202
		Mirsakhanov R.F., Sabitov L.S., Garkin I.N. ENGINEERING AND CONSTRUCTION AESTHETICS OF PEN S.S.....	211



Юбилей Пензенского государственного университета архитектуры и строительства – знаменательная дата для Пензенской области. 65 лет назад начался отсчет славных дел вашего учебного заведения, реализация которых привела к заметному преобразению Пензенского края. Появились современные по тому времени производственные, жилые и общественные здания, новый импульс получило промышленное строительство. Высокие темпы строительства требовали и требуют высококвалифицированных инженеров, архитекторов и других строительных специалистов, и ПГУАС прекрасно справляется с подготовкой кадров для строительной отрасли.

Выпускники университета, а также преподаватели, ученые постоянно находятся в центре деловой жизни, активно участвуют в решении важных для региона задач. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по праву может гордиться тем, что сегодняшние города и поселки построены и обустроены его выпускниками.

Ныне трудно представить Пензенскую область без строительного вуза. Университет стал ее подлинным научно-образовательным и культурным центром. Здесь рождаются новые идеи по совершенствованию образования и воспитания, развитию строительного комплекса и созданию комфортной среды проживания.

В ПГУАС созданы прекрасные условия для гармоничного развития студентов. Наряду с учебой они имеют возможность заниматься спортом, любимой общественной работой в молодежном центре университета. С их участием более красочно и содержательно проводятся праздники, а достижения в спорте, художественной самодеятельности, волонтерском движении, студенческих строительных отрядах приумножают славу Пензенского края на всероссийском уровне.

Время постоянно ставит перед нами новые задачи. Выражаю надежду на вашу всемерную поддержку и помощь в поиске оптимальных решений по дальнейшему развитию Пензенской области. Поздравляю ПГУАС со славным юбилеем и желаю коллективу университета и его выпускникам творческих успехов!

**Губернатор
Пензенской области**



О.В. Мельниченко



Болдырев С.А. – ректор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства

Сафьянов А.Н. – проректор по НР Пензенского государственного университета архитектуры и строительства

Еремкин А.И. – советник губернатора Пензенской области, советник при ректорате

ВКЛАД ПЕНЗЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА В РАЗВИТИЕ РЕГИОНА

Обозначены важная роль и значимость строительного образования и строительной отрасли в развитии экономики Пензенской области. Отмечено, что Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС) на протяжении уже 65 лет принимает активное участие в решении задач в области строительства, образования и науки в регионе, а развитие строительной отрасли во многом зависит от успехов университета.

Продemonстрированы современные достижения Пензенского региона в области строительной сферы, обеспечения безопасности и качества строительства, повышения уровня эффективности строительного производства и строительной индустрии, а также подготовки и переподготовки специалистов для решения городских и областных программ развития экономики Пензенской области.

Предложен комплекс мероприятий, направленных на дальнейшее развитие строительной отрасли и совершенствование строительного образования, соответствующего современным требованиям и стандартам.



Рис. 1. Здание Правительства
Пензенской области



Рис. 2. Учебный корпус №3 ПГУАС

Стратегическая цель развития строительного комплекса Пензенской области – формирование устойчивой экономики строительной отрасли, обладающей достаточным потенциалом, обеспечивающим рост уровня жизни и стандартов проживания граждан региона. Поставленную задачу с успехом решает целый комплекс строительных организаций, на которых трудятся около 30,5 тыс. человек. Строительный университет ежегодно выпускает 1000 высококвалифицированных специалистов. В валовом региональном продукте доля строительной отрасли составляет около 7 %.

В результате государственной поддержки и с использованием собственных возможностей в регионе осуществляется строительство объектов производственного, социально-культурного и жилищного назначения.

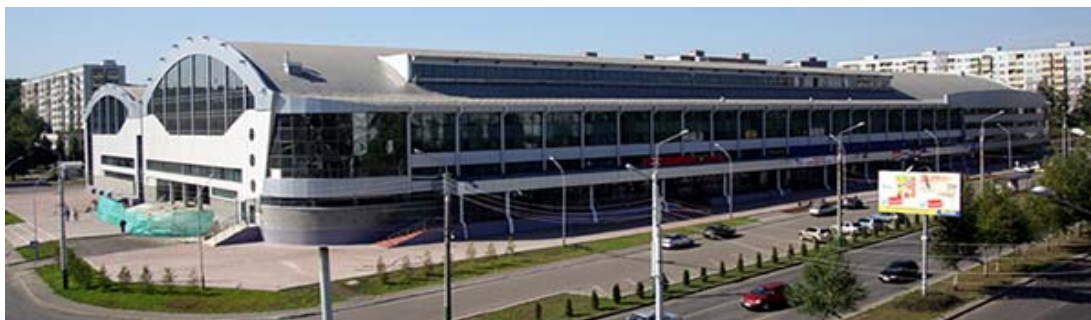


Рис. 3. Дворец спорта «Буртасы», г. Пенза



Рис. 4. Город «Спутник», Пензенский район

Жилищное строительство является главной движущей силой строительной отрасли. Развитие жилищного строительства в регионе направлено на выполнение Указа Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года», реализацию национального проекта «Жилье и городская среда» и стратегии социально-экономического развития Пензенской области на период до 2035 г.

Приоритетными механизмами выполнения государственной политики в жилищном строительстве являются программа «Стимул» федерального проекта «Жилье» и подпрограммы «Стимулирование развития жилищного строительства в Пензенской области», «Обеспечение жильем и коммунальными услугами населения Пензенской области».

Наиболее значимый результат реализации федерального проекта «Жилье» и национального проекта «Жилье и городская среда» – строительство объектов социальной, инженерной и дорожной инфраструктуры за счет средств бюджета, что является важнейшей мерой государственной поддержки строительной отрасли.

На строительство объектов инфраструктуры в рамках программы «Стимул» федерального проекта «Жилье» в 2022 году затрачено 237 млн руб. При реализации подпрограммы «Стимулирование развития жилищного строительства в Пензенской области» освоены средства в размере 46,2 млн руб.



Рис. 5. Развязка федеральной трассы М5 «Урал»



Рис. 6. Дворец спорта «Олимпийский», г. Пенза



Рис. 7. Школа в ЖК «Арбековская застава», г. Пенза

В 2022 году на территории Пензенской области введено в эксплуатацию 828,5 тыс. кв. метров жилья, в том числе 354,1 тыс. кв. метров многоквартирного жилья и 474,4 тыс. кв. метров индивидуального жилья. Ввод жилья на 1 жителя составил 0,65 кв. метра. Комплексный подход к поддержке строительной отрасли позволил Пензенской области по итогам года сохранить свои лидирующие позиции среди субъектов РФ: 1-е место среди регионов ПФО и 10-е место в России.

Объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство», за 2022 год составил 55,4 млрд руб. Налоговые отчисления позволяют поддерживать и развивать социальную сферу в регионе.

Одним из условий улучшения ситуации в строительстве стала господдержка: ключевой мерой следует считать выделение бюджетных средств на субсидирование процентной ставки по ипотечным кредитам. На региональном уровне заключено соглашение о сотрудничестве с АО «ДОМ.РФ», направленное на обеспечение доступности ипотеки и предоставление гражданам льготных ипотечных кредитов. В 2022 году в регионе выдано 344 льготных кредита на 1,2 млрд руб. с процентной ставкой от 3 %. Рост доступности ипотечных кредитов обеспечивает развитие рынка недвижимости и жилищного строительства. Данное мероприятие приобретает особую значимость и снимает социальное напряжение в обществе за счет возможности улучшения жилищных условий семьям с невысокими доходами. Льготная ипотека остается самым востребованным инструментом в жилищном строительстве.

Динамика основных показателей социально-экономического развития строительной отрасли в Пензенской области за 2020-2022 гг. представлена в таблице.

Основные показатели развития строительной отрасли Пензенской области

Наименование показателя	Единица измерения	2020	2021	2022
Ввод жилья в эксплуатацию	тыс. кв. м	852,2	855,5	828,5
в % к предыдущему году	%	101,8	100,4	96,9
Ввод индивидуального жилья	тыс. кв. м	512,9	533,0	474,4
в % к предыдущему году	%	96,1	104,0	89,0
Ввод многоквартирного жилья	тыс. кв. м	339,3	322,5	354,1
в % к предыдущему году	%	111,6	95,1	109,8
Ввод жилья на 1 человека	кв. м/чел.	0,65	0,67	0,65
Общая площадь жилых помещений на 1 человека	кв. м/чел.	31,5	32,5	*
Количество выданных ипотечных жилищных кредитов	ед.	15776	17408	11282
Объем выданных ипотечных кредитов	млн руб.	30466	39751	32871
Средневзвешенная процентная ставка по ипотечным кредитам	%	6,58	7,3	6,13
Объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство»	млрд руб.	45335	50011,7	54407
в % к предыдущему году	%	112,1	100,2	94,5

Приведенные в таблице данные демонстрируют положительную динамику развития строительной отрасли в регионе.

В 2022 году осуществлялось строительство зданий и сооружений производственного и социально-культурного назначения. Благодаря государственной поддержке сданы в эксплуатацию птичники на 692,8 тыс. мест, помещения для крупного рогатого скота на 5,7 тыс. мест, для кроликов на 6,2 тыс. мест, силосные и сенажные сооружения на 30 тыс. кубометров, овощехранилища на 8,3 тыс. тонн, зерносклады и зерносеменовохранилища на 46,5 тыс. тонн, зерносушилки на 132 тонны в час, теплицы на 11,8 тыс. кв. метров и др.

Введено в эксплуатацию новейшее оборудование по переработке растительного масла на 64,5 тонны в сутки, увеличены емкости элеваторов – на 80 тыс. тонн хранения, оборудования по производству: комбикормов – на 1 тыс. тонн в сутки, пиломатериалов – на 17,5 тыс. кубометров, гофрокартона – на 8 млн кв. метров и др.

Введены в эксплуатацию: Спасский кафедральный собор в г.Пензе, спортивный зал площадью 2,4 тыс. кв. метров в Кузнецком районе, хоккейная площадка площадью 1,5 тыс. кв. метров в Сердобске, детский сад на 50 мест, общеобразовательные школы на 900 мест, проведена реконструкция приемного отделения клинической больницы №6 имени Г.А. Захарьина и бактериологической лаборатории, введены газовые сети протяженностью 240,9 км, водопроводные – 23,2 км, канализационные – 8,8 км.

Объем строительных работ, выполненных в Пензенской области за счет собственных средств, составил 55,4 млрд рублей.

В соответствии с федеральной инвестиционной программой велось строительство лабораторно-диагностического корпуса областного онкологического диспансера площадью 13,6 тыс. кв. метров, общеобразовательной школы в селе Засечном на 2425 мест и Пензенского государственного цирка на 1400 мест.

Построены предприятия торговли на 24,5 тыс. кв. метров торговой площади, гостиницы на 83 места, общетоварные склады площадью 52,1 тыс. кв. метров, предприятия общественного питания на 285 посадочных мест.



Рис. 8. Птичник, коровник и элеватор в Пензенской области



Рис. 9. Детский сад, г.Пенза



Рис. 10. Спасский кафедральный собор, г.Пенза

Меры господдержки строительной отрасли сработали в 2022 году, и есть уверенность в том, что эти меры продолжатся и в 2023 году и регион с поставленными задачами справится.

В 2023 году по программе «Стимул» федерального проекта «Жилье» финансирование строительства 6 объектов из федерального бюджета увеличено в 2,5 раза по сравнению с 2022 годом и составило 401,7 млн руб.

Государственная поддержка строительства позволит в 2023 году продолжить работы по строительству, реконструкции и капитальному ремонту лабораторно-диагностического корпуса ГБУЗ «Областной онкологический диспансер», корпуса поликлиники №2 ГБУЗ «Пензенская районная больница» с возведением пристроя к поликлинике с размещением в нем Центра амбулаторной онкологической помощи, школы на 1100 мест в районе ул. Измайлова, 76 (г. Пенза), школы на 2425 мест в с. Засечное Пензенского района, центра активного долголетия ГАУ «Пензенский дом ветеранов» на 120 мест, объекта культурного наследия – метеорологической обсерватории, 4 учреждений культуры и 1 общеобразовательной организации. Также уже ведутся работы по строительству взрослой поликлиники ГБУЗ «Кузнецкая межрайонная больница» в Кузнецком районе, физкультурно-оздоровительного комплекса для игровых видов спорта в г. Пензе, школы на 550 мест в с. Бессоновка, школы на 150 мест в с. Большой Вьяс Лунинского района, по капитальному ремонту 15 образовательных организаций и др.



Рис. 11. Детский сад в с.Бессоновка Пензенской области



Рис. 12. ФОК в г.Каменка Пензенской области

В строительстве и проектировании указанных объектов активное участие принимали выпускники строительного университета. Кроме того, еще целый ряд объектов запроектирован коллективом ПГУАС с учетом современных тенденций.

В 2022 году университет был задействован в реализации приоритетных национальных проектов «Образование», «Доступное и комфортное жильё – гражданам России», «Безопасные и качественные дороги» и «Безопасная и комфортная среда».

Выполнялись работы по заданиям хозяйствующих субъектов, органов исполнительной власти различных уровней, арбитражного и районных судов, направленные на социально-экономическое развитие Пензенского региона и защиту прав его жителей.

По государственному контракту с ГКУ «Управление строительства и дорожного хозяйства Пензенской области» была разработана проектная документация по объекту «Строительство общеобразовательной организации на 550 мест».



Рис. 13. Школа в городе «Спутник»

Как член Ассоциации СРО «Объединение строительного комплекса и ЖКХ «Большая Волга» ПГУАС осуществлял строительный контроль за проведением различных строительных работ подрядными организациями. Данные работы в 2022 году были выполнены по муниципальным контрактам, заключенным с МКУ «Управление капитального строительства г. Пензы», на следующих объектах:

– «Строительство домов для переселения граждан из аварийного жилья, г. Пенза, в квартале, ограниченном улицами Беляева – Литейная – Ударная – Воровского (II этап). Жилой дом поз. 3, 4 и 5»;

– «Крытый каток с искусственным льдом по ул. 65-летия Победы, 8 мкр. Арбеково, г. Пенза». На данном объекте университет проводил также работы по корректировке ПСД и ведению авторского надзора.



Рис. 14. Дома для участников городской программы по расселению из ветхого и аварийного жилья

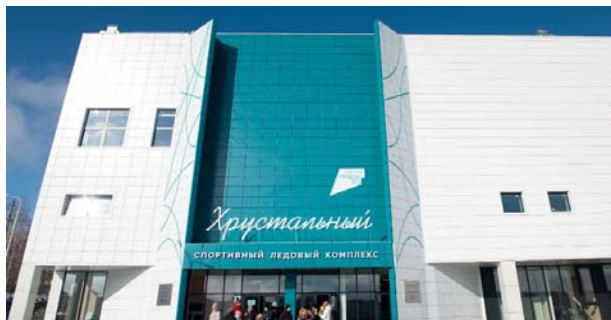


Рис. 15. Ледовый дворец «Хрустальный»

Специалистами университета успешно исполнены муниципальный контракт с МКУ «Управление капитального строительства г. Заречного» по разработке проектной документации на капитальный ремонт нежилого здания МДОУ «Детский сад №19» в г. Заречном и два государственных контракта с Управлением Судебного департамента в Пензенской области по разработке проектно-сметной документации на выборочный капитальный ремонт фасадов зданий Лопатинского и Никольского районных судов Пензенской области.

По договору с филиалом АО «НПЦАП» – «ПО «Корпус» (г. Саратов) успешно исполнены работы по виброметрическому обследованию фундаментов под рабочие места регулировки приемосдаточных испытаний изготавливаемых изделий на территории заказчика.

По заданию ООО «Инвест-Евро-Пенза» проведены исследования работы общеобменных систем вентиляции для наладки воздушного баланса здания МТРК «Коллаж».



Рис. 16. Торгово-развлекательный комплекс «Коллаж», г. Пенза

Выполнены работы по актуализации схемы водоснабжения и водоотведения рабочего поселка Золотаревка Пензенского района Пензенской области и по разработке и исследованию технологии растворения воздуха в вихревом сатураторе.

По муниципальному контракту с МКУ «Управление капитального строительства г. Пензы» были проведены работы по корректировке рабочей документации и по ведению авторского надзора по объекту «Строительство общегородской магистрали от II микрорайона».

Принципиальное значение господдержки строительной отрасли заключается в том, что последняя играет исключительно важную роль в социально-экономическом развитии региона и вносит значительный вклад во внутренний валовой продукт (ВВП). По итогам 2022 года в региональном валовом продукте доля строительной отрасли

составила около 7 %, в 2023 году предусматривается увеличение вклада строительной отрасли в ВВП региона. Строительство обеспечивает около 9 % рабочих мест в экономике региона и является одним из крупнейших работодателей в Пензенской области. На базе строящихся объектов студенты университета проходят производственную практику, изучают новые технологии и осваивают основы управления производством. Ученые ПГУАС внедряют результаты своих исследований в строительную отрасль. Значительную роль в популяризации научных достижений региона и России в целом играет журнал «Региональная архитектура и строительство», занимающий одно из ведущих мест в списке авторитетных журналов России.

Строительство – это не только возведение квадратных метров зданий и сооружений, но и производство щебня, камня, гипса, а также цемента, кирпича, плитки, строительных конструкций, асфальта, металлопроката и металлоконструкций, отделочных материалов, стекла, пластика, труб и др. Все эти и другие строительные материалы надо закупать и обеспечивать логистическую систему их подвоза. Таким образом, строительная деятельность обеспечивает доход транспортным организациям, торговле, энергетике, сектору ЖКХ, способствует развитию промышленности и сферы услуг.

Развитие строительной отрасли влечет за собой увеличение спроса на мебель, бытовую технику и другие товары для дома, способствует повышению качества жизни населения в регионе – а это важный фактор, способствующий снижению социальной напряженности и конфликтов в обществе.

Все эти обстоятельства позволили строительной отрасли выиграть конкуренцию за масштабную государственную поддержку и финансирование у всех других отраслей экономики.

Государственной мерой поддержки строительной отрасли может стать содействие в подготовке квалифицированных инженерных и рабочих кадров длястроек, научных и проектных организаций, поскольку отсутствие достаточного количества высококвалифицированных специалистов тормозит решение проблем и задач в области строительства в современных экономических условиях. Необходимо повышать престиж строительных специальностей и учебных заведений. Для этого следует оснащать строительные учебные заведения современной учебной и научной материально-технической базой, выделять дополнительные бюджетные места для целевой подготовки специалистов по заказам строительных компаний,.

Таким образом, строительная отрасль – это мощный локомотив экономического роста и социального развития региона, который тянет за собой другие отрасли экономики, а вклад ПГУАС в реализацию приоритетных национальных проектов и подготовку профессиональных строительных кадров способствует решению важнейших задач в области строительства, образования и науки в регионе.. Именно поэтому органам федеральной и региональной исполнительной власти важно не только продолжать, но и усиливать поддержку строительной отрасли в долгосрочной перспективе.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.32

DOI 10.54734/20722958_2023_3_13

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д. 4

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе,
советник РААСН
E-mail: prorector.umn@spbgasu.ru

*Петербургский государственный
университет путей сообщения
им. Императора Александра I*
Россия, 190031, Северо-Западный
федеральный округ, Санкт-Петербург,
Московский пр., д. 9

Беленцов Юрий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: belents@mail.ru

*Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering*
Russia, 190005, St. Petersburg,
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-rector for
Scientific Work, Adviser of the Russian
Academy of Architectural and Building
Science
E-mail: prorector.umn@spbgasu.ru

*St. Petersburg State University of Railways
named after Emperor Alexander I*

Russia, 190031, North-Western Federal
District, St. Petersburg, 9, Moskovsky Pr.

Belentsov Yuri Alekseevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Building Materials and
Technologies»
E-mail: belents@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Е.В. Королев, Ю.А. Беленцов

Обоснована целесообразность применения теории информации при решении общих и частных задач строительного материаловедения. Представлена оценка и сформулированы предложения по развитию системы классификации строительных материалов; продемонстрировано влияние структуры системы классификации на количество получаемой информации. Показано, что при исследовании разрушения материала количество информации возрастает пропорционально количеству независимых систем фиксации параметров этого процесса. Рассмотрен способ обоснования выбора технологического решения по критерию максимума полезной информации, определяемой по результатам анализа статистических данных исследования свойств материала, формирующих его качество.

Ключевые слова: теория информации, строительное материаловедение, система классификации, бетон, эксплуатационные свойства, разрушение материала, качество, технологическое решение, технико-экономическая эффективность

APPLICATION OF THE THEORY OF INFORMATION IN SOLVING PROBLEMS OF CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

E.V. Korolev, Yu.A. Belentsov

The paper substantiates the expediency of applying the theory of information in solving general and particular problems of building materials science. An assessment is presented and proposals are formulated for the development of a system for classifying building materials; the influence of the structure of the classification system on the amount of information received is demonstrated. It is shown that when studying the destruction of a material, the amount of information increases in proportion to the number of independent systems for fixing the parameters of this process. A method is presented to justify the choice of a technological solution according to the criterion of maximum useful information, determined by the results of the analysis of statistical data from the study of the properties of the material that forms its quality.

Keywords: information theory, building materials science, classification system, concrete, operational properties, material destruction, quality, technological solution, technical and economic efficiency

Современный строительный материал, как правило, имеет сложную многоуровневую, гетерогенную и гетерофазную структуру, включающую большое количество различных структурных элементов, различающихся по составу и структуре, генезису и морфологии. Структурообразование таких материалов протекает постоянно – от начального этапа формирования параметров структуры и свойств до разрушения материала от воздействия эксплуатационных факторов. Формирование и изменение структуры материала является нелинейным процессом, для определения его параметров используются различные кинетические зависимости.

Некоторые полезные результаты при исследовании структурообразования может дать теория информации. Эта теория находит широкое применение в различных областях исследований: от погоды, медицины до хаоса [1–18]. В этой теории чётко классифицируются «данные» и «информация» [5]. Также обосновываются условия для появления информации: указывается, что стационарная система не производит информации [1]. При этом информация рассматривается как физическая величина, оцениваемая количественно и имеющая единицу измерения. По количеству информации оценивается уменьшение степени незнания (информационной энтропии) об объекте исследования (наблюдения). Важно отметить, что теория информации продолжает развитие и выработку новых подходов (см., например, [19–22]).

Применение теории информации в строительном материаловедении базируется на известной пирамиде познания [5], в основании которой находятся данные. Анализ данных позволяет извлечь информацию, которая является основой для установления закономерностей (понимания природы явления, эффекта). Поэтому от количества информации зависит качество познания структурообразования материала, механизма его разрушения от воздействия эксплуатационной среды. Это условие получило наименование «принцип максимума информации» [2].

Количество информации I принято оценивать по формуле Шеннона [6–9]:

$$I = -\sum_i^n p_i \log p_i = -H, \quad (1)$$

где p_i – вероятность нахождения исследуемой системы в состоянии x_i ; H – информационная энтропия, равная степени неопределённости системы и характеризующаяся числом её возможных состояний и вероятностями этих состояний.

Отсюда следует, что количество информации о системе будет тем больше, чем выше была степень неопределённости. Из формулы (1) следует, что максимальное значение информационной энтропии достигается для системы, в которой все состояния равновероятны.

При проведении наблюдения за системой X посредством измерения состояния системы Y важно учитывать взаимосвязанность этих систем, то есть насколько по

состоянию системы Y можно оценивать состояние системы X . Например, при испытании образца материала при сжатии показания манометра гидравлического пресса (система Y) не могут однозначно дать характеристику системе трещин (система X) в образце.

Характер взаимного влияния систем зависит от вида зависимости (табл. 1), а количество информации о системе X по сведениям, получаемым по состояниям системы Y , равно:

$$I(Y, X) = H(X) - H(X/Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y), \quad (2)$$

где $I(Y, X)$ – количество информации о системе X , содержащейся в системе Y ; $H(X/Y)$ – условная информационная энтропия системы X относительно системы Y , определяемая вероятностью $p(x_i/y_i)$ принятия системой X состояния x_i при условии, что система Y находится в состоянии y_i .

При этом верно:

$$I(Y, X) = I(X, Y) \quad (3)$$

и

$$H(X) + H(Y) > H(X, Y),$$

где $I(X, Y)$ – полная информация, содержащаяся в системах X и Y ; $H(X, Y)$ – полная информационная энтропия объединённой системы (X, Y) .

Т а б л и ц а 1

Количество информации в зависимости от характера зависимости между системами X и Y [6]

№ п/п	Вид зависимости между системами	Характеристики зависимости
1	Системы X и Y независимы	$I(X, Y) = 0$, нельзя получить сведения о системе X , наблюдая за системой Y
2	Системы X и Y эквивалентны	$I(X, Y) = H(X) = H(Y)$, состояние системы Y полностью определяет состояние системы X

При установлении взаимосвязи между системами X и Y посредством установления вероятности p_{ij} , определяющей, что совместная система (X, Y) будет находиться в состоянии (x_i, y_j) , количество информации равно [6]:

$$I(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{p_i r_j}, \quad (4)$$

где p_i – вероятность перехода системы Y в новое состояние; r_j – вероятность перехода системы X в новое состояние.

Представленная формула (4) является универсальным инструментом анализа объединённых систем.

Рассмотрим некоторые общие решения задач строительного материаловедения, основанные на теории информации.

I. Система классификации. Очевидно, что информационная ёмкость системы классификации зависит от количества признаков, по которым проводится класси-

фикация, и количества градаций каждого признака. Кроме количества информации об объекте система классификации может дать оценку количества уникальных объектов.

Эти две самостоятельные, но сопряжённые задачи могут быть решены в рамках подходов теории информации. Так, для оценки количества информации рассмотрим систему классификации, содержащую N признаков, каждый из которых содержит m градаций. Информационная вероятность p_i для каждого признака равна:

$$p_i = 1/m. \quad (5)$$

Количество информации, рассчитанное по формуле Шеннона, для систем классификации, содержащих $N = 1 \dots 15$ и $m = 2 \dots 15$, представлено на рис. 1, а.

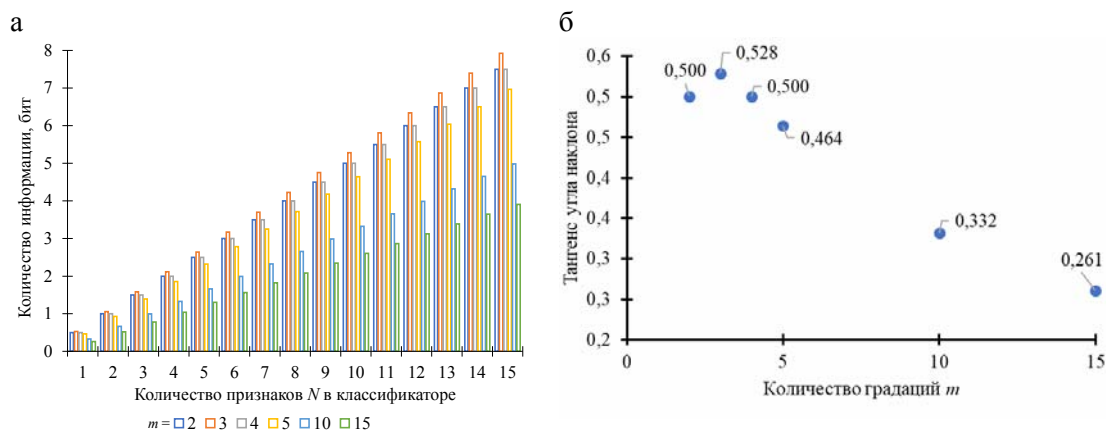


Рис. 1. Количество информации в сообщении при использовании выбранной системы классификации (а) и зависимость тангенса угла наклона зависимости $I = f(N)$ от количества градаций m (б)

Представленные данные демонстрируют закономерный результат: с увеличением количества признаков классификации возрастает количество информации об объекте, что означает уменьшение информационной энтропии, характеризующей степень незнания объекта. Причём при прочих равных условиях количество информации об объекте зависит от количества градаций каждого признака (рис. 1, б). Максимальное количество информации содержится в сообщении об объекте при его классификации по системе с $N = 15$ и $m = 3$. Общую зависимость количества информации в рассмотренном диапазоне изменения параметров системы классификации можно представить в виде:

$$I = 2,686N \frac{\sqrt[m]{0,107}}{m^{0,809}}. \quad (6)$$

Для определения количества уникальных объектов, которые можно описать с применением выбранной системы классификации воспользуемся подходом, предложенным Б.В. Сухотиным [2], а в качестве системы классификации примем классификацию бетонов по ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования».

В соответствии с [2] число объектов, которые можно классифицировать принятой системой классификации, будет равно:

$$M = \prod_{\alpha} m_{\alpha}^{N_{\alpha}}, \quad (7)$$

где α – количество признаков N_{α} с градацией m_{α} .

По ГОСТ 25192-2012 бетоны классифицируются по 12 признакам (табл. 2) с различным количеством градаций в каждом: в классификации имеются признаки с коли-

чеством градаций от 2 до 5. Наиболее часто встречаются признаки с количеством градаций 3 (рис. 2, а).

Т а б л и ц а 2

Классификация бетонов по ГОСТ 25192-2012

№ п/п	Наименования признака	Количество градаций в признаке m
1	Основное назначение	2
2	По стойкости к видам коррозии	5
3	Вид вяжущего	5
4	Вид заполнителей	3
5	Структура	4
6	Условия твердения	3
7	Прочность	2
8	Темп набора прочности	2
9	Средняя плотность	4
10	Морозостойкость	3
11	Водонепроницаемость	3
12	Истираемость	3

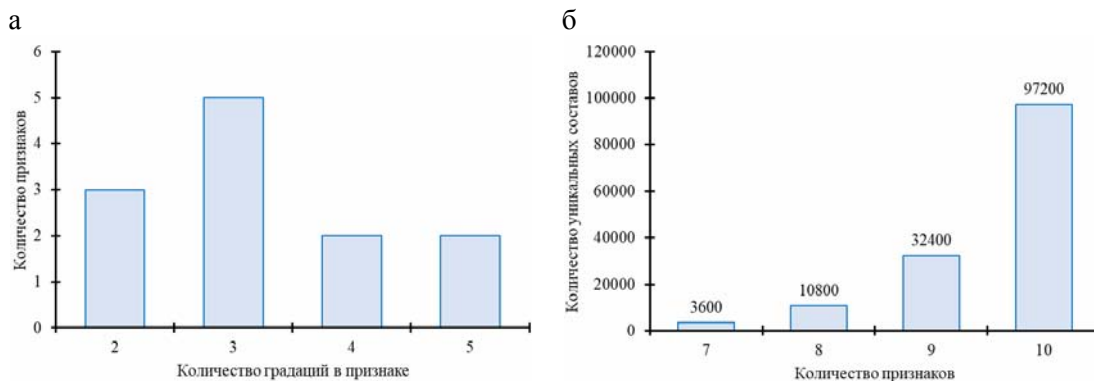


Рис. 2. Распределение признаков в классификации бетонов по количеству градаций (а) и количество уникальных составов бетонов в зависимости от количества признаков, по которым они классифицированы (б)

Количество уникальных составов бетонов в соответствии с их классификацией равно:

$$M = \prod_{\alpha} m_{\alpha}^{N_{\alpha}} = 2^3 \cdot 3^5 \cdot 4^2 \cdot 5^2 = 777600. \quad (8)$$

Однако в системе классификации бетонов можно выделить независимые признаки и коррелирующие признаки (рис. 3). Под коррелирующимися признаками понимаются взаимозависимые признаки. В рассматриваемом случае такая связь может быть установлена между всеми свойствами бетона в соответствии с законом створа, предложенным И.А. Рыбьевым [23]. Наличие такой связи предопределяет возможность замены признаков, классифицирующих бетоны по отдельным свойствам, на интегральные признаки. Это значительно сокращает количество уникальных составов бетонов (см. рис. 2,б). Так, для системы классификации, содержащей только независимые признаки, количество уникальных составов равно 3600. При добавлении одного дополнительного интегрального признака (с $m = 3$) количество составов возрастает до 10800, а при введении трёх дополнительных признаков – до 97200 уникальных

составов. Для рассматриваемой классификации бетонов увеличение количества уникальных составов описывается зависимостью

$$M = 1,65e^{1,0986(7+N_{add})}, \quad (9)$$

где N_{add} – количество дополнительных интегральных признаков классификации бетонов.



Рис. 3. Классификация признаков бетона

Величины I и M могут быть использованы для оценки системы классификации как при разработке, так и при модернизации. За критерий качества системы классификации можно принять аддитивную зависимость, так как каждое слагаемое зависит только от структуры системы классификации (рис. 4, а):

$$K_q = 0,5 \frac{I(N, m)}{I_{\max}} + 0,5 \frac{M(N, m)}{M_{\max}}, \quad (10)$$

где $I_{\max}$ – максимальное количество информации (принято $I_{\max} = N_{\max} \cdot m_{\max}$; здесь $N_{\max} = 15$, $m_{\max} = 3$); $M_{\max}$ – максимальное количество уникальных объектов классификации ($M_{\max} = m_{\max}^{N_{\max}}$).

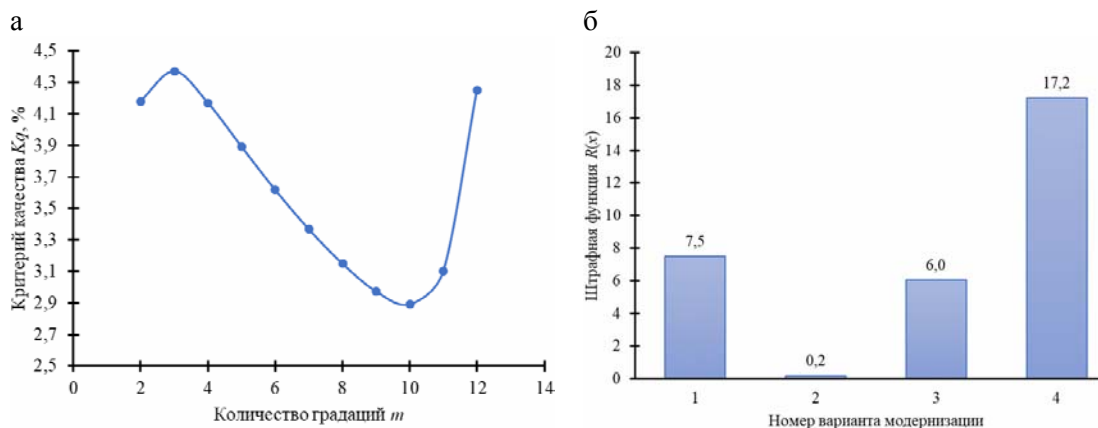


Рис. 4. Влияние структуры системы классификации на её качество (а) и зависимость штрафной функции $R(x)$ от вариантов модернизации системы классификации бетонов (б)

Данные, представленные на рис. 4, а, подтверждают ранее полученный результат, из которого следует, что высокоинформативная система классификации обладает следующей структурой: $N = \max$ и $m = 3$. Рост K_q после $N = 10$ является следствием скачкообразного роста величины уникальных объектов M .

На основе этого результата можно сформулировать предложения по модернизации системы классификации бетонов. Рассмотрим несколько вариантов такой модернизации (табл. 3). Варианты сформулированы из предположения, что к 7 независимым признакам классификации будут добавляться также независимые признаки с различной величиной градации в каждом признаке. Общее число признаков будет составлять, как и в действующей системе классификации бетонов, $N_{\max} = 12$.

Т а б л и ц а 3

Варианты модернизации системы классификации бетонов

№ варианта модернизации системы классификации	Количество признаков базовой части	Количество градаций дополнительных признаков	Общее количество признаков классификации
№1	7	$m = 2$	12
№2	7	$m = 3$	12
№3	7	$m = 4$	12
№4	7	$m = 5$	12

Критериями для выбора варианта модернизации также являются условия:

$$I = \max \text{ и } M = \max.$$

Введём характеристику – приведённое количество информации, приходящееся на один состав бетона:

$$q_I = \ln \left(\frac{I(N, m)}{M(N, m)} \right). \quad (11)$$

Для сравнения результатов используем штрафную функцию и установим условие для выбора варианта модернизации системы классификации:

$$R(x) = \sum_{i=1}^{N_{add}} \left(q_I(x)_i - q_I(0)_i \right)^2 = \min, \quad (12)$$

где $q_I(0)$ – приведённое количество информации для действующей системы классификации бетонов; x – вариант модернизации.

Результаты расчёта $R(x)$ представлены на рис. 4,б, из которых следует, что действующую систему классификации бетонов целесообразно модернизировать посредством введения независимых признаков классификации, имеющих количество градаций $m = 3$. Такой вариант модернизации имеет величину приведённого количества информации, близкую к величине q_I в действующей системе классификации бетона. При этом количество уникальных составов M и количество информации I больше. Для классификации бетонов, представленной в ГОСТ 25192-2012, максимальное количество информации о рассматриваемом бетоне будет равно 6,07 бит, а для модернизированной системы – 6,127 бит. При этом очевидно, что с увеличением количества признаков классификации количество информации также будет расти: на каждый дополнительный признак количество информации будет увеличиваться на 0,528 бит.

К таким свойствам бетона, которые могут быть использованы для модернизации системы классификации, относятся характеристики, определяемые не только параметрами структуры, но и свойствами вещества бетона. Например, коэффициент термического расширения, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоёмкости и др. Очевидно, что свойства могут быть сгруппированы (сформулированы интегральные признаки классификации), а также установлены требования к контрольным значениям свойств.

Для действующей системы классификации бетонов максимальное количество уникальных составов равно 777600 ед. Однако наличие взаимозависимых признаков резко сокращает эту величину до 3600 ед. (при $N = 7$). Очевидно, что количество разработанных вариантов бетонов, соответствующих области применения ГОСТ 25192-2012, существенно больше указанных величин. Это демонстрирует предел количества составов бетонов, различающихся по качеству, но практически неограниченное количество – по рецептуре. Указанное подтверждает ранее представленное в [24] соображение о том, что получение заданного уровня качества (величин эксплуатационных свойств) может быть обеспечено различным набором и диапазонами варьирования рецептурных и технологических факторов. Такое ограничение по количеству уникальных составов бетонов, различающихся по качеству, позволяет установить следующее:

1. Для технологических решений, применение которых приводит к получению бетонов, входящих в группу уникальных составов по ГОСТ 25192-2012, критерием результативности является технико-экономическая эффективность. При этом должны быть получены знания, необходимые для выявления механизмов и особенностей структурообразования таких бетонов, то есть то, что составляет научную новизну исследования.

2. Наличие коррелирующихся признаков классификации предполагает, что новые виды бетонов будут характеризоваться свойствами, не подчиняющимися закону створа: прочные, но обладающие низкой средней плотностью; плотные, но имеющие низкий коэффициент теплопроводности и т.д.

3. Развитие строительного материаловедения требует не только поиска новых технологических решений, но и обеспечения качества формирования и учёта информации, получаемой при проведении исследований. Указанное предполагает, что по результатам разработки бетона его классификация (по действующей или модернизированной системе) должна быть проведена в полном объёме с указанием достигнутого количественного результата.

Ещё одним самостоятельным этапом развития системы классификации является применение *позиционной системы классификации*. Такая система представляет собой **числовой код**, длина (количество цифр) которого равна количеству признаков классификации, *величина* цифры равна номеру градации в признаке, а *положение* цифры в коде – номеру признака в системе классификации.

В качестве примера рассмотрим бетон, который в соответствии с ГОСТ 25192-2012 имеет градации, представленные в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Классификация бетона в соответствии с ГОСТ 25192-2012

№ п/п	Признак	Градация	Величина цифры в позиционном коде
1	2	3	4
1	Основное назначение	Конструкционный	1
2	Стойкость к видам коррозии	Бетоны, эксплуатируемые в среде без риска коррозионного воздействия	1
3	Вид вяжущего	Цемент	1
4	Вид заполнителей	Плотные	1
5	Структура	Плотная	1

1	2	3	4
6	Условия твердения	Естественные условия	1
7	Прочность	Средней прочности	1
8	Темп набора прочности	Медленнотвердеющие	2
9	Средняя плотность	Тяжёлые	3
10	Морозостойкость	Средней морозостойкости	2
11	Водонепроницаемость	Низкой водонепроницаемости	1
12	Истираемость	Низкой истираемости	1

П р и м е ч а н и е . Величина цифры в позиционном коде выбрана согласно номеру градации в соответствующем признаке; например, для признака «основное назначение» градация «конструктивный» в ГОСТ 25192-2012 находится на первом месте из двух, поэтому присвоено значение «1».

На основе данных, представленных в табл. 4, сообщение о рассматриваемом бетоне, выраженное в буквенной форме, будет состоять из 272 знаков (включая пробелы и знаки препинания), из них 237 букв:

«Бетон плотный, тяжёлый, на цементе и плотном заполнителе, медленнотвердеющий в естественных условиях, конструкционный, средней прочности, эксплуатируемый в среде без риска коррозионного воздействия, средней морозостойкости, низкой водонепроницаемости, низкой истираемости»;
сообщение в позиционном коде будет иметь 12 цифр:
«111 111 123 211».

С позиции теории информации количество информации в сообщении о бетоне, выраженное в буквенной форме при условии равной вероятности выбора буквы в сообщении ($p_1 = 1/33$), будет равно:

$$I_1 = \sum_{i=1}^{237} p_1 \log_2(p_1) = 36,228 \text{ бит},$$

а количество информации в позиционном коде ($p_2 = 0,2$ при $m = 5$) –

$$I_2 = \sum_{i=1}^{12} p_2 \log_2(p_2) = 5,573 \text{ бит}.$$

Однако сведения о бетоне в указанных сообщениях одинаковы. Разница в количестве информации I_1 и I_2 указывает, что информационная ёмкость буквы в буквенном сообщении меньше, чем цифры в позиционном коде. На это указывают величины частных информаций этих сообщений:

$$i_1 = p_1 \log_2(p_1) = 0,153 \text{ бит}$$

и

$$i_2 = p_2 \log_2(p_2) = 0,464 \text{ бит}.$$

Кроме информационной ценности позиционный код имеет и другие преимущества:

1. Позиционный код предполагает проведение полной классификации бетона, что позволит минимизировать ошибки или выявить коллизии при проектировании и строительстве объекта.

2. Позиционный код имеет форму записи, удобную для размещения в информационных моделях объектов строительства. Количество информации о бетоне, содержащейся в такой записи, существенно больше, что позволит при эксплуатации объекта, его перепрофилировании или других мероприятиях исключить нерациональные варианты использования, приводящие к снижению безопасности и возникновению экономического ущерба.

II. Исследование разрушения материала. В рассмотренном ранее примере об испытании образца бетона при сжатии на прессе выделим несколько взаимодействующих систем. Система X – система трещин в образце бетона, возникающая и развивающаяся в процессе испытания. Предельным состоянием системы X является образование магистральной трещины, приводящей к необратимому разделению образца на части. Система Y – гидравлическая система пресса, состояние которой оценивается по данным манометра или другого датчика, фиксирующего давление в системе. Гипотетически сформулируем вероятности $p_{x,i}$, $p_{y,i}$ и p_{ij} . Вероятность перехода системы X будет возрастать при проведении испытания (рис. 5,а). Вероятность p_{ij} , то есть вероятность перехода системы X в состояние x_i после перехода системы Y в состояние y_i , представим в виде следующей матрицы:

Состояние (x_i, y_j)		Состояние системы Y					
		y_1	y_2	y_3	y_j	$\dots$	y_n
Состояние системы X	x_1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{1j}	$\dots$	p_{1n}
	x_2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{2j}	$\dots$	p_{2n}
	x_3	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{3j}	$\dots$	p_{3n}
	x_i	p_{i1}	p_{i2}	p_{i3}	p_{ij}	$\dots$	p_{in}
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
	x_n	p_{n1}	p_{n2}	p_{n3}	p_{nj}	$\dots$	p_{nn}

Предположим, что распределение p_{ij} для каждого состояния описывается зависимостью, по виду близкой к нормальному распределению случайной величины. На рис. 5,б представлен вид такого распределения, для описания которого в зависимости от состояния системы использована формула

$$p_{i,j+k} = \frac{p_{i,j}}{C^k}, \quad (13)$$

где k – порядковый номер состояния относительно состояния с заданной вероятностью p_{ij} ; C – константа.

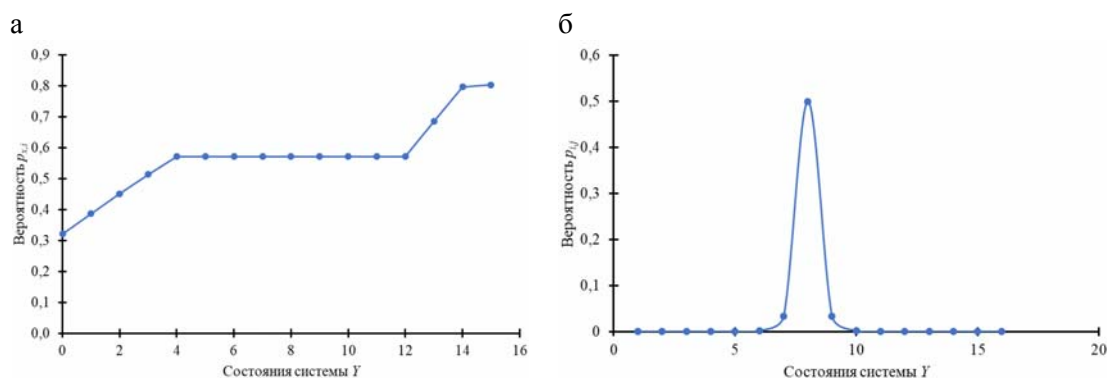


Рис. 5. Распределение вероятностей $p_{x,i}$ (а) и p_{ij} (б)

Количество информации, которое будет получено при таком распределении вероятностей $p_{x,i}$ и p_{ij} по формуле (4), равно 1,027 бит (при $C = 15$). Очевидно, что корректировка величин $p_{x,i}$ и p_{ij} приводит к изменению $I(X, Y)$: при увеличении

константы C количество информации возрастает, так как переход системы X в новые состояния становится более определённым; изменение характера $p_{x,i}$ на равновероятный также приводит к увеличению количества информации, что следует из формулы (1).

Однако основным способом увеличения количества информации о системе X (системе трещин в образце бетона) является не корректировка вероятностей $p_{x,i}$ и p_{ij} , а добавление новых независимых систем по отношению к системе Y , но зависимых от системы X . В этом случае количество информации, получаемой от рассматриваемой пары объединённых систем (например (X, Y)), будет увеличиваться пропорционально количеству таких пар систем. Для исследования разрушения образца такими дополнительными системами могут быть: система измерения геометрических размеров образца (система Z), система измерения скорости ультразвука (система U), система измерения сигналов акустической эмиссии (система A) и т.д. Количество информации о разрушении материала в этом случае равно:

$$I = I(X, Y) + I(X, Z) + I(X, U) + I(X, A) = 4,108 \text{ бит.} \quad (14)$$

Выбор как способа изучения, так и количества пар систем определяется физикой процесса разрушения и отсутствием конфликтов между системами измерения. При этом должен быть выполнен принцип максимума информации.

III. Обоснование варианта. Выбор состава (варианта технологического решения) является одним из заключительных этапов разработки материала. Часто для решения этой задачи используют метод многокритериальной оптимизации, в котором целевой функцией является обобщённый критерий качества материала. Этот критерий может быть сформулирован разными способами, однако для задач строительного материаловедения используют аддитивные мультипликативные функции [25, 26], которые представляют собой сумму слагаемых (аддитивная функция) в виде среднегеометрических значений частных критериев качества (мультипликативная функция), сгруппированных по соответствующему признаку свойств материала, формирующих его качество (технологические свойства смеси, физико-механические свойства, эксплуатационные свойства и т.д.). Каждое слагаемое в обобщённом критерии качества представлено с соответствующим коэффициентом весомости, сумма слагаемых равна единице. Каждый частный критерий представляет собой отношение величины свойства разработанного материала к аналогичной величине свойства материала, принятого за базовый. Требования к качеству базового материала (совокупности свойств) могут формулироваться произвольно, или могут использоваться сведения о передовом материале, представленном на рынке. Первый вариант формулирования требований целесообразно использовать при разработке материала с расширенной областью применения, а второй – при разработке альтернативы базовому материалу. В качестве общего ограничения, реализуемого при многокритериальной оптимизации состава и режима изготовления материала, устанавливается превышение или равенство контрольных значений свойств. В случае нарушения этого ограничения частный критерий принимается равным нулю.

Развитие указанного подхода представлено в формулировании обобщённого критерия технико-экономической эффективности, в котором кроме технического эффекта учитываются затраты на реализацию предлагаемого технологического решения [25, 26].

В рассмотренных вариантах выбора варианта технологического решения отсутствует оценка его достижения. В работе [26] вводится понятие коэффициента достижения технологического решения и предлагается методика его оценки исходя из возможности технологического оборудования. В данной работе предлагается дополнить эту оценку результатами статистического наблюдения.

Для этого введём понятие «количество полезной информации» I_p , под которой понимается количество информации, соответствующей установленному требованию.

В рамках решаемой задачи это требование состоит в учёте только тех результатов испытания материала (определения свойств), величина которых не отклоняется от среднего значения свойства более заданной относительной погрешности δ . В этом случае критерием выбора варианта технологического решения, а также оценкой технологической его реализуемости будет являться:

$$K_Q = \sum_{i=1}^K \frac{I_{p,i}}{I_i} = \max, \quad (15)$$

где $I_{p,i}$ и I_i – соответственно количества полезной и общей информации, получаемые из результатов испытания i -го свойства; K – общее количество свойств, формирующих качество материала.

Определение величин $I_{p,i}$ и I_i предлагается проводить следующим образом. По экспериментальным данным находим размах значений:

$$R = x_{\max} - x_{\min},$$

где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – максимальная и минимальная величины исследуемого свойства x .

Размах разбивается на z_k участков, для каждого из которых определяется количество экспериментальных данных n_k , попадающих в соответствующий интервал $\Delta x \in R$. Далее для каждого интервала Δx вычисляется частота v_k , равная:

$$v_k = \frac{n_k}{N_d},$$

где N_d – общее количество экспериментальных данных.

В соответствии с теорией информации каждый интервал можно ассоциировать как состояние системы, а частоту v_k – с вероятностью нахождения системы в этом состоянии.

Для каждого интервала Δx рассчитываются средние значения $\bar{x}_k$ (проводится биннинг данных [5]), а также среднее значение по всей совокупности экспериментальных данных $\bar{x}$. Для каждого $\bar{x}_k$ вычисляется относительное отклонение от среднего значения:

$$\delta_k = \left| \frac{\bar{x}_k - \bar{x}}{\bar{x}} \right|.$$

При формальном соответствии вероятности p_i частоте v_k вычисление количества информации проводят по формуле (1): для расчёта общего количества информации используются все частоты, а при расчёте количества полезной информации – только частоты, удовлетворяющие условию

$$\delta_k \leq \delta.$$

Расчёты, выполненные на модельной системе (генерация случайной величины свойства в заданном интервале), показывают, что с увеличением величины размаха R количество полезной информации уменьшается (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Результаты расчёта доли полезной информации K_Q

$\delta, \%$	Доля полезной информации K_Q (%) для размахов R			
	20–25	20–30	20–35	20–40
6,5	48,0	34,7	26,6	23,6
5,0	34,9	33,2	18,7	12,1

Ужесточение требования к качеству (уменьшение δ) приводит к уменьшению K_Q .

Отсюда следует, что уменьшение размаха R рассеивания экспериментальных данных свойств материала является качественной характеристикой реализуемости разработанного технологического решения (коэффициент линейной корреляции $r = -0,88$).

Заключение.

1. Представленный анализ демонстрирует, что теория информации может быть применена для решения как общих, так и частных задач строительного материаловедения. Наличие информации при исследовании структурообразования указывает на протекание нелинейных процессов структурообразования, для которых могут быть установлены области синергетического (эффекта) влияния управляющих рецептурных и технологических факторов.

При использовании теории информации в различных разделах строительного материаловедения важным является не само количество информации, а достижение максимума информации при рассмотрении различных вариантов решения задачи.

2. Анализ произвольной системы классификации показывает, что количество информации, которая может быть получена об объекте исследования при её применении, возрастает с увеличением количества признаков классификации и при количестве градаций в признаке, равном трём.

Результаты рассмотрения системы классификации бетонов по ГОСТ 25192-2012 демонстрируют, что эта система классификации содержит независимые и коррелирующиеся признаки. Наличие таких признаков существенно сокращает количество уникальных по качеству составов бетонов. Такие ограничения позволяют определить критерии для результативности диссертационных исследований, а именно для технологических решений, обеспечивающих получение бетона, входящего в группу уникальных составов по ГОСТ 25192-2012. Критерием результативности диссертации должна являться технико-экономическая эффективность. Результативность других технологических решений определяется получением нового строительного материала, обладающего новым сочетанием свойств, формирующих его качество.

Модернизация системы классификации бетонов должна основываться на принципах, характерных для произвольной системы классификации, а именно на большом количестве признаков классификации с числом градаций каждого признака, равным трём. Также в условиях цифровой трансформации экономики эффективным инструментом записи классификации бетонов является позиционный код, который содержит полную информацию о бетоне, что позволяет избежать коллизий на этапе строительства и принятия ошибочных решений при перепрофилировании объекта.

3. При исследовании сложных явлений структурообразования материала, таких, как трещинообразование, принцип максимума информации достигается посредством включения дополнительных взаимонезависимых систем, но зависимых от объекта исследования. При испытании бетона кроме данных о механической нагрузке такими системами могут быть: система измерения геометрических размеров образца, система измерения скорости ультразвука, система измерения сигналов акустической эмиссии и т.д. В этом случае количество информации увеличивается пропорционально количеству таких дополнительных систем исследования.

4. Дополнительной областью применения теории информации является обоснование выбора рецептуры и режима изготовления материала. Для этого проводится расчёт коэффициента реализуемости технологического решения, для которого статистическое рассеивание результатов испытаний свойств является минимальным, а количество полезной информации максимально.

Список литературы

1. Глик, Дж. Хаос. Создание новой науки / Дж. Глик. – М.: АСТ: Corpus, 2023. – 432 с.

2. Голицын, Г.А. Гармония и алгебра живого / Г.А. Голицын, В.М. Петров. – М.: Знание, 1990. – 128 с.
3. Теория информации и ее приложения (сборник переводов) / под ред. А.А. Харкевича. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 328 с.
4. Кавалеров, Г.И. Введение в информационную теорию измерений / Г.И. Кавалеров, С.М. Мандельштам. – М.: Энергия, 1974. – 376 с.
5. Пейдж, С. Модельное мышление. Как анализировать сложные явления с математических моделей / С. Пейдж. – М.: Манн, Иванов, Фербер, 2020. – 528 с.
6. Блинова, И.В. Теория информации / И.В. Блинова, И.Ю. Попов. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 84 с.
7. Хромов, Л.И. Теория информации и теория познания / Л.И. Хромов. – 2-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Русского философского общества, 2021. – 310 с.
8. Лидовский, В.В. Теория информации / В.В. Лидовский. – М.: Компания Спутник+, 2004. – 111 с.
9. Чикрин, Д.Е. Теория информации и кодирования / Д.Е. Чикрин. – Казань: Казанский университет, 2013. – 116 с.
10. Мкртчян, С.В. Дизайн и теория информации / С.В. Мкртчян // Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. – 2019. – № 3–2. – С. 212–222.
11. Ахметов, Т.Р. Технологии искусственного интеллекта, инновации и теория эволюции информации в экономике / Т.Р. Ахметов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2019. – № 3. – С. 92–100.
12. Rakitskiy, A.A. Information theory as a means of determining the main factors affecting the processors architecture / A.A. Rakitskiy, B.Ya. Ryabko // Computational Technologies. – 2020. – Vol. 25. – № 6. – С. 104–115.
13. Нажесткин, И.А. Теория интегрированной информации и её применение к анализу нейронной активности головного мозга / И.А. Нажесткин, О.Е. Сварник // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2023. – Т. 31, № 2. – С. 180–201.
14. Розенберг, Г.С. Теоретическая экология и теория информации: некоторые объединяющие принципы / Г.С. Розенберг // Принципы экологии. – 2021. – № 4 (42). – С. 4–25.
15. Чернавский, Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации / Д.С. Чернавский // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – Т. 11, № 6. – С. 156–159.
16. Левченков, В.С. Теория выбора и проблема поиска информации в www / В.С. Левченков // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 403, № 2. – С. 178–182.
17. Чернавская, О.Д. Динамическая теория информации как базис естественно-конструктивистского подхода к моделированию мышления / О.Д. Чернавская // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 433–447.
18. Боженко, Е.В. Теория информации в экономико-математическом моделировании / Е.В. Боженко, Т.Ю. Махина // Журнал экономических исследований. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 30–38.
19. Вяткин, В.Б. Синергетическая теория информации. Часть 1. Синергетический подход к определению количества информации / В.Б. Вяткин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 44. – С. 1–24.
20. Вяткин, В.Б. Синергетическая теория информации. Часть 2. Отражение дискретных систем в плоскости признаков их описания / В.Б. Вяткин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 45. – С. 1–30.
21. Вяткин, В.Б. Синергетическая теория информации. Часть 3. Информационные функции и энтропия Больцмана / В.Б. Вяткин // Политематический сетевой элек-

тронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 46. – С. 1–10.

22. Вяткин, В.Б. Синергетическая теория информации. Часть 4. Квантовые аспекты отражения конечных множеств / В.Б. Вяткин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 69. – С. 81–95.

23. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.

24. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.

25. Королев, Е.В. Методики и алгоритм синтеза радиационно-защитных материалов нового поколения / Е.В. Королев, А.П. Самошин, В.А. Смирнов, О.В. Королева, А.Н. Гришина. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2009. – 132 с.

26. Королев, Е.В. Технико-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование / Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2017. – № 3. – С. 85–89.

References

1. Glick, J. Chaos. Creation of a new science / J. Glick. – M.: AST: Corpus, 2023. – 432 p.

2. Golitsyn, G.A. Harmony and algebra of the living / G.A. Golitsyn, V.M. Petrov. – M.: Znanie, 1990. – 128 p.

3. Theory of information and its applications (collection of translations) / edited by A.A. Harkevich. – M.: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1959. – 328 p.

4. Kavalero, G.I. Introduction to the information theory of measurements / G.I. Kavalero, S.M. Mandelstam. – M.: Energiya, 1974. – 376 p.

5. Page, S. Model thinking. How to analyze complex phenomena from mathematical models / S. Page. – M.: Mann, Ivanov, Ferber, 2020. – 528 p.

6. Blinova, I.V. Information theory / I.V. Blinova, I.Y. Popov. – St. Petersburg: ITMO University, 2018. – 84 p.

7. Khromov, L.I. Information theory and theory of cognition / L.I. Khromov. – 2nd ed., supplement. – St. Petersburg: Publishing House of the Russian Philosophical Society, 2021. – 310 p.

8. Lidovsky, V.V. Information theory / V.V. Lidovsky. – M.: Sputnik+ Company, 2004. – 111 p.

9. Chikrin, D.E. Theory of information and coding / D.E. Chikrin. – Kazan: Kazan University, 2013. – 116 p.

10. Mkrtchyan, S.V. Design and information theory / S.V. Mkrtchyan // Bulletin of the S.G. Stroganov RSHPU. Decorative art and the subject-spatial environment. – 2019. – No. 3–2. – P. 212–222.

11. Akhmetov, T.R. Artificial intelligence technologies, innovations and the theory of information evolution in economics / T.R. Akhmetov // Izvestiya Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – No. 3. – P. 92–100.

12. Rakitskiy, A.A. Information theory as a means of determining the main factors affecting the processors architecture / A.A. Rakitskiy, B.Ya. Ryabko // Computational Technologies. – 2020. – Vol. 25. – No. 6. – P. 104–115.

13. Najestkin, I.A. Theory of integrated information and its application to the analysis of the neural activity of the brain / I.A. Najestkin, O.E. Svarnik // Izvestiya vysshikh uchebnykh uchebnykh. Applied nonlinear dynamics. – 2023. – Vol. 31, No. 2. – P. 180–201.

14. Rosenberg, G.S. Theoretical ecology and information theory: some unifying principles / G.S. Rosenberg // Principles of Ecology. – 2021. – № 4 (42). – P. 4–25.

15. Chernavsky, D.S. Synergetics and information. Dynamic theory of information / D.S. Chernavsky // News of higher educational institutions. Applied nonlinear dynamics. – 2003. – Vol. 11, No. 6. – P. 156–159.
16. Levchenkov, B.S. The theory of choice and the problem of finding information in www / B.S. Levchenkov // Reports of the Academy of Sciences. – 2005. – Vol. 403, No. 2. – P. 178–182.
17. Chernavskaya, O.D. Dynamic theory of information as the basis of a natural constructivist approach to modeling thinking / O.D. Chernavskaya // Computer research and modeling. – 2017. – Vol. 9, No. 3. – P. 433–447.
18. Bozhenko, E.V. Information theory in economic and mathematical modeling / E.V. Bozhenko, T.Y. Makhina // Journal of Economic Research. – 2018. – Vol. 4, No. 3. – P. 30–38.
19. Vyatkin, V.B. Synergetic theory of information. Part 1. A synergetic approach to determining the amount of information / V.B. Vyatkin // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2008. – No. 44. – P. 1–24.
20. Vyatkin, V.B. Synergetic theory of information. Part 2. Reflection of discrete systems in the plane of signs of their description / V.B. Vyatkin // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2009. – No. 45. – P. 1–30.
21. Vyatkin, V.B. Synergetic theory of information. Part 3. Information functions and Boltzmann entropy / V.B. Vyatkin // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2009. – No. 46. – P. 1–10.
22. Vyatkin, V.B. Synergetic theory of information. Part 4. Quantum aspects of reflection of finite sets / V.B. Vyatkin // Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University. – 2011. – No. 69. – P. 81–95.
23. Rybyev, I.A. Construction materials science / I.A. Rybyev. – M.: Higher School, 2004. – 701 p.
24. Korolev, E.V. Prospects for the development of construction materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – No. 3. – P. 143–159.
25. Korolev, E.V. Methods and algorithm of synthesis of radiation-protective materials of a new generation / E.V. Korolev, A.P. Samoshin, V.A. Smirnov, O.V. Koroleva, A.N. Grishina. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2009. – 132 p.
26. Korolev, E.V. Technical and economic efficiency of new technological solutions. Analysis and improvement / E.V. Korolev // Building materials. – 2017. – No. 3. – P. 85–89.

УДК 666.91

DOI 10.54734/20722958_2023_3_29

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46.

Алфимова Наталия Ивановна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: alfimovan@mail.ru,

Левицкая Ксения Михайловна,
аспирант кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com

Елистраткин Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Alfimova Natalya Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building materials, products
and designs»
E-mail: alfimovan@mail.ru

Levickaya Ksenia Mikhailovna,
Graduate Student of the department «Building
materials, products and designs»
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com

Elistratkin Mikhail Yurievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building materials, products
and designs»
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

Исследование выполнено при административной поддержке Научно-образовательного
центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» (г. Белгород)
с использованием оборудования Центра высоких технологий
Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО ИЗ ЦИТРОГИПСА

Н.И. Алфимова, К.М. Левицкая, М.Ю. Елистраткин

Рассмотрена возможность применения механоактивации для повышения эффективности использования гипсосодержащих отходов промышленности в качестве сырья для производства гипсовых вяжущих. Выявлены оптимальные режимы изготовления, которые при минимальных затратах электроэнергии позволяют получить вяжущие марки Г-5, Г6.

Ключевые слова: цитрогипс, гипсосодержащие отходы, помол, энергоэффективность

This work was realized under the administrative support of the Belgorod Scientific and Educational Center of the world-level «Innovative Solutions in the Agricultural Sector», using equipment of High Technology Center at BSTU named after V. G. Shukhov

OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR MANUFACTURING A BINDING FROM CITROGYPSUM

N.I. Alfimova, K.M. Levickaya, M.Yu. Elistratkin

The possibility of using mechanical activation to increase the efficiency of using gypsum-containing industrial waste as a raw material for the production of gypsum binders is considered. Optimal manufacturing modes have been identified, which, with minimal power consumption, make it possible to obtain binders of the G-5, G6 grades.

Keywords: citrogypsum, gypsum-containing waste, grinding, energy efficiency

1. Введение

Растущие темпы строительства требуют увеличения объемов строительных материалов и вяжущих. В настоящее время наиболее востребованным на рынке строительным материалом является портландцемент, однако на его производство приходится порядка 5–8 % глобальных выбросов CO₂ [1, 2], а также существуют значительные риски для здоровья людей, задействованных на его производстве [2]. В от-

личие от портландцемента, гипсовые вяжущие отличаются простотой и экологичностью производства, низкими энергозатратами, капиталовложениями и металлоемкостью оборудования. Однако не во всех регионах существует природная сырьевая база для их производства. Альтернативой в данном случае могут служить гипсодержащие отходы (ГСО) различных промышленных производств [3, 4], такие, как фосфогипс [5, 6], отход десульфурации дымовых газов [7, 9], цитрогипс (ЦГ) [9] и др.

Необходимо отметить, что при применении стандартных технологических режимов и технологий из ГСО крайне сложно получить гипсовое вяжущее с высокими характеристиками [9, 10, 11]. Это обусловлено рядом их особенностей: во-первых, нестабильностью вещественного состава и наличием большого количества примесей, что требует поиска способов их очистки или внесения изменений в технологический режим; во-вторых, высокой дисперсностью сырья, которая отражается на качестве конечного продукта. Для повышения эффективности использования ГСО в качестве сырья для производства вяжущих различными научными группами разработан ряд дополнительных мероприятий, заключающихся в использовании модификаторов, технологических приемов, специальных режимов получения самого гипсового вяжущего и изделий на его основе [11, 12]. К одному из таких технологических приемов, с помощью которого можно повысить качественные характеристики вяжущих, относится помол.

Наиболее часто механоактивация рассматривалась в качестве приема для повышения качественных характеристик многокомпонентных вяжущих систем на основе портландцемента [13–16], а также однокомпонентных активированных щелочью шлаковых или зольных систем [17, 18]. При этом исследователи отмечают, что механоактивация способствует существенному повышению активности и прочности как одно-, так и многокомпонентных систем.

Исходя из вышеизложенного, стоит предположить, что применение помола вяжущих, полученных из гипсодержащих отходов, тоже будет способствовать повышению их качественных характеристик. Однако несмотря на свою доказанную эффективность, процесс помола связан с определенными энергетическими затратами, что требует проведения исследований, направленных на их оптимизацию.

В связи с вышеизложенным исследование возможности применения механоактивации для повышения эффективности использования гипсодержащих отходов в качестве сырья для производства вяжущих является актуальным. В качестве объекта исследования выступил отход биохимического синтеза лимонной кислоты – цитрогипс (ЦГ) (г. Белгород).

2. Методы

Изготовление вяжущего из цитрогипса (цитрогипсового вяжущего (ЦГВ)) осуществляется по трем режимам:

1. Режим 1: Дегидратация → выдерживание до постоянной массы → помол (*P1*).
2. Режим 2: Дегидратация → помол → выдерживание до постоянной массы (*P2*).
3. Режим 3: Дегидратация → прокаливание → выдерживание до постоянной массы (*P3*).

Дегидратация. Для *P1* и *P2* дегидратация осуществлялась в следующей последовательности: из предварительно высушенного в естественных условиях лаборатории (влажность 34 ± 2 % и температура 20 ± 2 °C) цитрогипса исключались крупные каменистые включения, после чего он засыпался на противень (общая масса навески 2 кг) и помещался в сушильный шкаф. Дегидратация осуществлялась при температуре сушильного шкафа 175 °C, длительность процесса составляла 2,5 часа.

Для *P3* дегидратация осуществлялась в лабораторном шкафу, однако масса навески составляла 450 г предварительно молотого в течение 1, 2, 3, 4, 5, 6 минут цитрогипса. Прокаливание осуществлялось при температуре сушильного шкафа 175 °C, длительность процесса составляла 2,5 часа.

Выдерживание до постоянной массы. В зависимости от режима осуществлялось выдерживание вяжущего на открытом воздухе до достижения им постоянной массы. При изготовлении вяжущего по *P1* выдерживание осуществлялось после дегидратации

цитрогипса в сушильном шкафу, набор массы после выдерживания на открытом воздухе составил 4,2 %.

При изготовлении вяжущего по *P2* выдерживание вяжущего осуществлялось после помола цитрогипсового вяжущего, набор массы после выдерживания на открытом воздухе составил 3,2 %.

При изготовлении вяжущего по *P3* выдерживание вяжущего осуществлялось после дегидратации измельченного с определенным временным интервалом цитрогипса. Набор массы после выдерживания на открытом воздухе составил 3,5 %.

Помол. Помол вяжущего (*P1*, *P2*) / цитрогипса (*P3*) осуществлялся в шаровой мельнице при загрузке 500 г вещества, длительность помола от 1 до 6 минут с шагом 1 минута.

Изучение морфологии частиц вяжущих и микроструктуры гипсового камня осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem. Измерение удельной площади поверхности и распределения пор по размерам проводилось методом объемной адсорбции газа с помощью BELSORP-miniX (MicrotracBEL). Измерение удельной поверхности и среднего размера частиц порошкообразных твердофазных компонентов проводилось на многофункциональном измерительном приборе PCX-12 (SP). Вязкость гипсового теста определялась с помощью ротационного вискозиметра Smart FungiLab.

Определение сроков схватывания гипсового теста стандартной консистенции (нормальной густоты), предела прочности на растяжение при изгибе и сжатии, определение водопоглощения осуществлялось с применением стандартного оборудования по методикам, приведённым в ГОСТ 23789-2018.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследование влияния режимов изготовления вяжущих на скорость помола

Для выявления оптимальных технологических параметров механоактивации цитрогипсовых вяжущих были проведены исследования влияния режимов их изготовления на скорость помола. На основе полученных данных была определена зависимость изменения удельной поверхности от длительности помола (рис. 1).

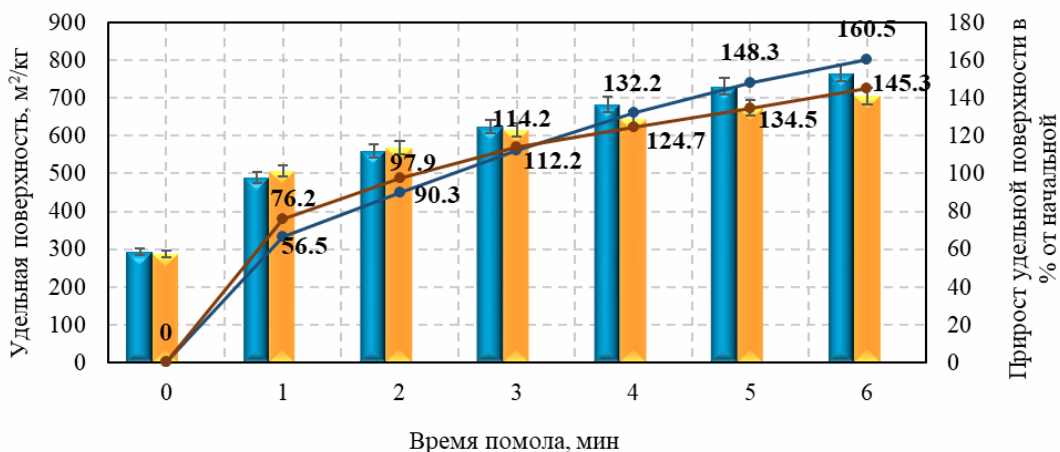


Рис. 1. Изменение удельной поверхности в зависимости от длительности помола и режима изготовления ЦГВ:
— *P1*; — *P2*

Из графика (см. рис. 1) видно, что максимальный прирост удельной поверхности происходит после одной минуты помола; это обусловлено низкой твердостью самого материала и разрушением на первом этапе присутствующих в системе конгломератов, образованных в результате агрегации более мелких частиц. После 3 минут помола наблюдается снижение эффективности помола, что проявляется снижением прироста удельной поверхности в единицу времени.

При этом необходимо отметить, что в зависимости от режима изготовления вяжущего скорость нарастания удельной поверхности меняется. Так, для вяжущего, изготовленного по *P2*, после 1 и 2 минут помола прирост удельной поверхности составил 76,2 и 97,9 % соответственно, что выше, чем у вяжущего, изготовленного по *P1* (66,5 и 90,3 %). Прирост удельной поверхности для обоих видов вяжущих, которые мололись 3 минуты, примерно равный – 112,2 % (*P1*) и 114,2 % (*P2*). Однако при длительности помола 4, 5 и 6 минут картина меняется, и прирост удельной поверхности вяжущего, изготовленного по *P1*, становится выше, чем у вяжущего, изготовленного по *P2*. После 6 минут помола вяжущее, изготовленное по *P1*, имеет удельную поверхность на 15,2 % выше, чем вяжущее, изготовленное по *P2*.

Большую скорость нарастания удельной поверхности в начальный период помола для вяжущего, изготовленного по *P2*, можно объяснить переходом β - $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ в β -обезвоженный полугидрат сульфат кальция при нагреве в интервале температур 170–180 °С [19]. При этом переходе не происходит изменений кристаллической решетки, однако для нее характерна меньшая упорядоченность, стабильность и дефектность и, как следствие, более высокая размолоспособность.

Обезвоженная модификация полугидрата сульфата кальция отличается высокой гигроскопичностью и легко переходит в полугидрат, что подтверждается данными набора массы вяжущего при воздушном хранении [19].

При изготовлении вяжущего по *P3* замер удельной поверхности осуществлялся дважды: непосредственно после помола и после дегидратации в сушильном шкафу (рис. 2). После проведения эксперимента по основному плану дополнительно был осуществлен помол цитрогипса в течение 15 минут.

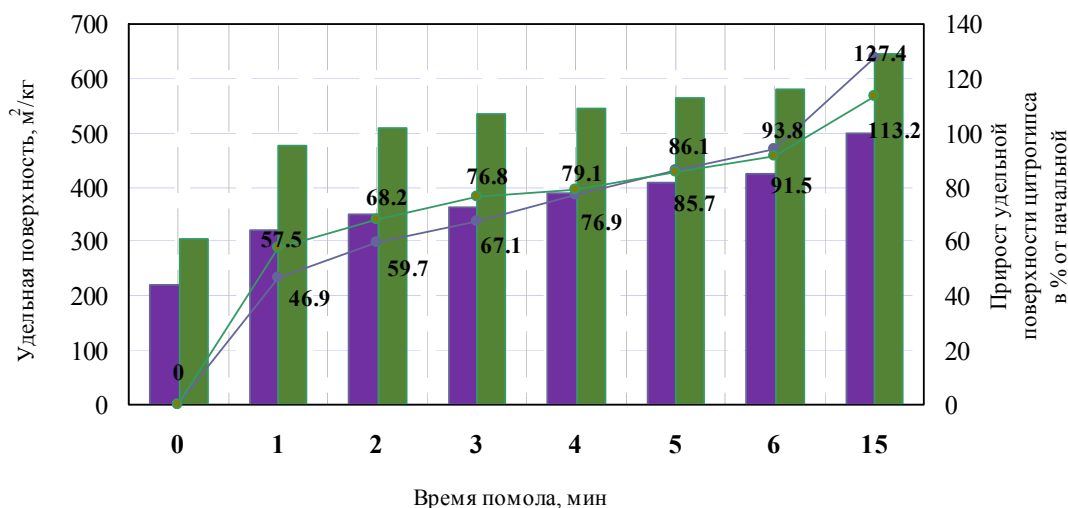


Рис. 2. Удельная поверхность ЦГ и ЦГВ на его основе в зависимости от длительности помола:

— ЦГ; — ЦГВ

Из графика (см. рис. 2) видно, что нарастание удельной поверхности цитрогипса при прочих равных параметрах помола идет значительно медленнее, чем для ЦГВ, изготовленных по *P1* и *P2*. Так, если у вяжущих после 6 минут помола удельная поверхность превысила 700 м²/кг (см. рис. 1), то для ЦГ она составила 424,6 м²/кг. Необходимо отметить, что даже после помола в течение 15 минут удельная поверхность цитрогипса не достигла показателей ЦГВ, изготовленных по *P1* и *P2*, и составила 498,3 м²/кг, при этом в ходе выгрузки наблюдалось налипание частиц материала на стенки мельницы и мелющие тела.

Повторное измерение удельной поверхности ЦГВ, полученных из молотого ЦГ, позволило установить, что обжиг способствует увеличению удельной поверхности в среднем на 157 м²/кг. Это обусловлено процессами, сопровождающими дегидратацию $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при высокотемпературном воздействии, а именно разрыхлением кристаллической решетки с образованием полугидрата β -модификации. Образование новых фаз начинается с поверхности кристалла с постепенным распространением процесса

вглубь, при этом объем исходного кристалла сохраняется. Удаление воды способствует образованию большого количества пор как в самих кристаллах, так и между ними, также происходит разрушение конгломератов, что и приводит к росту удельной поверхности после обжига.

Также необходимо отметить, что прирост удельной поверхности ЦГ и ЦГВ на его основе различны. Цитрогипс, диспергированный в течение 1, 2, 3 минут (см. рис. 2), отличается меньшим приростом удельной поверхности, чем ЦГВ, при этом разница в приросте составляет порядка 10–11 % в пользу ЦГВ. Прирост удельной поверхности цитрогипса, молотого 4, 5 и 6 минут, несущественно отличается от показателей ЦГВ (1–2 %), полученного термообработкой. Необходимо отметить, что при помоле 5 и 6 минут большим приростом удельной площади отличается цитрогипс; после 15 минут помола прирост удельной площади цитрогипса по отношению к начальным значениям составляет 127,4 %, в то время как для ЦГВ, полученного термообработкой, данный показатель составил 113,2 %, что объясняется снижением количества конгломератов и размера частиц с увеличением длительности помола ЦГ; как следствие, интенсивность описанных ранее процессов, связанных с разрыхлением кристаллической решетки, тоже снижается.

Отличия в характере и значениях удельной поверхности ЦГВ и ЦГ свидетельствуют как о разной твердости частиц вяжущего в сравнении с цитрогипсом, так и о влиянии на твердость частиц режима изготовления вяжущего. Более медленное увеличение поверхности цитрогипса (см. рис. 2) обусловлено большей твердостью и стабильностью кристаллической решетки $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в сравнении с $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и его обезвоженной модификацией (см. рис. 1).

Установленные закономерности будут играть большую роль при оценке энергоемкости процесса производства вяжущего. На данном этапе исследования можно сделать вывод, что большей технологичностью и энергоемкостью отличается процесс изготовления вяжущего по *P3*.

3.2. Характеристики гипсового теста и гипсового камня в зависимости от режима изготовления и времени помола ЦГВ

Для определения, при каком режиме можно получить вяжущее с максимальными показателями предела прочности при сжатии, были заформованы образцы-кубы размером 30×30×30 мм при равном водозатворении ($\text{В/Г}=0,8$). После расформовки образцы выдерживались в течение суток на открытом воздухе, после чего определялись их предел прочности при сжатии и средняя плотность (табл. 1). В качестве контроля выступало ЦГВ немолотое.

Т а б л и ц а 1

Характеристики гипсового камня и гипсового теста
в зависимости от режима изготовления и времени помола

Параметр	Режим	Время помола, мин						
		0 контроль	1	2	3	4	5	6
Средняя плотность, кг/м ³	<i>P1</i>	1065	1015	1025	1055	1058	1038	1045
	<i>P2</i>		1028	1047	1018	1022	1035	1021
	<i>P3</i>		1035	1008	1012	1020	1042	1018
Предел прочности при сжатии, МПа	<i>P1</i>	5,46	7,10	7,39	7,57	8,63	9,58	7,50
	<i>P2</i>		6,25	6,45	7,01	6,75	5,98	5,56
	<i>P3</i>		4,89	6,26	6,67	5,99	5,70	5,95
Вязкость, сП	<i>P1</i>	9438	7090	6510	6460	7070	8083	8939
	<i>P2</i>		7019	6267	6060	6623	6891	7061
	<i>P3</i>		8089	7824	7766	7770	7889	8120

Анализ полученных результатов позволил установить, что при применении *P1* максимальные значения прочности при сжатии характерны для гипсового камня,

изготовленного из ЦГВ с длительностью помола 5 минут ($S_{уд} \approx 730 \text{ м}^2/\text{кг}$) – 9,58 МПа; для режима *P2* максимальные значения прочности на сжатие характерны для гипсового камня, изготовленного из ЦГВ, молотого в течение 3 минут ($S_{уд} \approx 616 \text{ м}^2/\text{кг}$) – 7,01 МПа, для режима *P3* – также в течение 3 минут ($S_{уд} \approx 536 \text{ м}^2/\text{кг}$) – 6,67 МПа. Необходимо отметить, что вне зависимости от режима изготовления ЦГВ его домол способствует увеличению предела прочности при сжатии гипсового камня по отношению к контрольному образцу (5,46 МПа) за исключением ЦГВ, изготовленного по *P3*, помол которого осуществлялся 1 и 6 минут. При изготовлении ЦГВ по *P1* максимальный прирост предела прочности при сжатии по отношению к контрольному ЦГВ составил 75 %, при использовании *P2* – 28,4 %, при использовании *P3* – 22,16 %.

Анализ влияния режимов изготовления и длительности помола на изменение вязкости показал, что наименьшими значениями вязкости отличается ЦГВ, изготовленное по *P2*, максимальными – ЦГВ, изготовленное по *P3*.

Необходимо отметить, что вне зависимости от режима изготовления уже после 1 минуты помола наблюдается существенное снижение вязкости по отношению к контролю, что, скорее всего, связано с разрушением как конгломератов, так и пористой структуры частиц вяжущих. Снижение вязкости у ЦГВ, изготовленных по *P1* и *P2*, наблюдается при их помоле до 3 минут, дальнейшее увеличение длительности помола (4–6 минут) приводит к увеличению вязкости. Это связано с ростом удельной поверхности ЦГВ, что закономерно ведет к увеличению необходимого количества воды затворения.

Максимальное снижение вязкости наблюдается у ЦГВ, изготовленных по *P2*: после 1 минуты помола вязкость системы снизилась на 25,6 %, а после 3 минут – на 35,8 % по отношению к контрольному немолотому ЦГВ. В то же время для ЦГВ, изготовленного по *P2*, снижение вязкости после 1 и 3 минут помола составило 24,9 % и 31,6 % соответственно.

В случае с вяжущим, изготовленным по *P3*, снижение вязкости после 1 минуты помола составляет 14,3 %; минимальные значения вязкости также характерны для ЦГВ, молотого в течение 3 минут – 7766 сП, что на 17,7 % ниже значений контрольного немолотого ЦГВ.

Также необходимо отметить, что максимальным приростом вязкости после достижения минимальных значений отличается вяжущее, изготовленное по *P1*, – 38,4 %, в то время как для ЦГВ, изготовленного по *P2*, данный показатель составляет 16,5 %, а для *P3* – 4,6 %.

Выявленные закономерности изменения вязкости ЦГВ в зависимости от режима помола позволяют сделать вывод, что режим изготовления ЦГВ влияет на характер разрушения пористой структуры частиц и, как следствие, на их водопотребность и вязкость. Помимо этого, есть некое граничное значение удельной поверхности ЦГВ: в случае *P1* и *P2* оно составляет порядка 600–650 $\text{м}^2/\text{кг}$, помол до которой будет положительно отражаться как на пористости частиц ЦГВ (пористая структура будет разрушаться), так и на его водопотребности. При дальнейшем росте удельной поверхности вяжущих водопотребность и, как следствие, вязкость системы будет нарастать.

Помимо этого, вне зависимости от длительности помола, ЦГВ, изготовленное по *P2*, отличается минимальными значениями вязкости даже при примерно равных значениях удельной поверхности, что может свидетельствовать об отличии процесса измеления с $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (*P1*) и его обезвоженной модификации (*P2*).

3.3. Характеристики удельной площади поверхности и распределения пор по размерам цитрогипсовых вяжущих в зависимости от режима и времени помола

Анализ результатов измерения удельной площади поверхности и распределения пор по размерам ЦГВ в зависимости от режима и времени помола, полученных методом объемной адсорбции газа (табл. 2), позволил установить, что диспергирование способствует снижению удельной площади поверхности по отношению к немолотому ЦГВ (табл. 3).

Удельная площадь поверхности и распределение пор по размерам ЦГВ
в зависимости от длительности помола и режима изготовления вяжущего

P1				
Параметры	1 мин	3 мин	5 мин	
BET plot				
Удельная площадь поверхности, м²/кг	4043,9	6435,1	6198,8	
Общий объем пор (p/p₀=0,9900), см³/г	0,04215	0,057422	0,05624	
Средний диаметр пор, нм	43,735	35,693	36,291	
BJH plot				
Общий объем пор, см³/г	0,048467	0,063075	0,062293	
Преобладающий размер пор, нм	35,952	18,349	18,349	
Удельная площадь поверхности, м²/кг	4377,3	7387,7	6892,5	
Средний диаметр пор, нм	42,477	34,151	36,151	
P2				
Показатель	1 мин	3 мин	5 мин	
BET plot				
Удельная площадь поверхности, м²/кг	6540	6812,9	7324,8	
Общий объем пор (p/p₀=0,9900), см³/г	0,58164	0,058726	0,059964	
Средний диаметр пор, нм	35,574	34,479	32,746	
BJH plot				
Общий объем пор, см³/г	0,063681	0,065251	0,066793	
Преобладающий размер пор, нм	18,349	18,349	18,349	
Удельная площадь поверхности, м²/кг	6437	6860,5	7116,7	
Средний диаметр пор, нм	39,572	38,044	37,541	
P3				
Показатель	1 мин	3 мин	5 мин	15 мин
BET plot				
Удельная площадь поверхности, м²/кг	2685	4187,5	3102,4	5415,4
Общий объем пор (p/p₀=0,9900), см³/г	0,031908	0,04573	0,033931	0,058895
Средний диаметр пор, нм	47,534	43,682	43,747	43,502
BJH plot				
Общий объем пор, см³/г	0,035205	0,055235	0,038608	0,068667
Преобладающий размер пор, нм	35,952	35,952	3,886	60,459
Удельная площадь поверхности, м²/кг	3143,6	4219,6	3403,2	4933
Средний диаметр пор, нм	44,796	52,361	45,379	55,679

Т а б л и ц а 3

Удельная площадь поверхности и распределение пор по размерам контрольного ЦГВ

Параметры	ЦГВ
BET plot	
Удельная площадь поверхности, м ² /кг	10733
Общий объем пор ($p/p_0=0,9900$), см ³ /г	0,066878
Средний диаметр пор, нм	24,924
BJH plot	
Общий объем пор, см ³ /г	0,077822
Преобладающий размер пор, нм	3,7055
Удельная площадь поверхности, м ² /кг	11,429
Средний диаметр пор, нм	27,237

После помола в течение 1 минуты удельная площадь поверхности для ЦГВ, изготовленного по *P1*, снизилась в 2,7 раза, также снижается общий объем пор и увеличивается средний диаметр пор, что связано с разрушением конгломератов и пористой структуры частиц. Однако дальнейшее увеличение длительности помола, при котором размер частиц неизменно снижается, приводит к росту удельной площади поверхности, незначительному увеличению общего объема пор и снижению среднего диаметра пор. Удельная площадь поверхности ЦГВ, изготовленного по режиму *P2*, выше, чем у ЦГВ, изготовленного по режиму *P1*, что обусловлено большей твердостью частиц данного ЦГВ. Минимальные значения удельной поверхности характерны для ЦГВ, изготовленного по *P3*. При этом после 5 минут помола наблюдается снижение удельной площади поверхности по отношению к ЦГВ, молотому 3 минуты, что может свидетельствовать об агрегации частиц ЦГВ в данном случае.

Сравнение графиков, отображающих объем пор, соответствующих конкретному диаметру, позволило установить существенное его снижение у молотых вяжущих по отношению к контрольному немолотому (рис. 3).

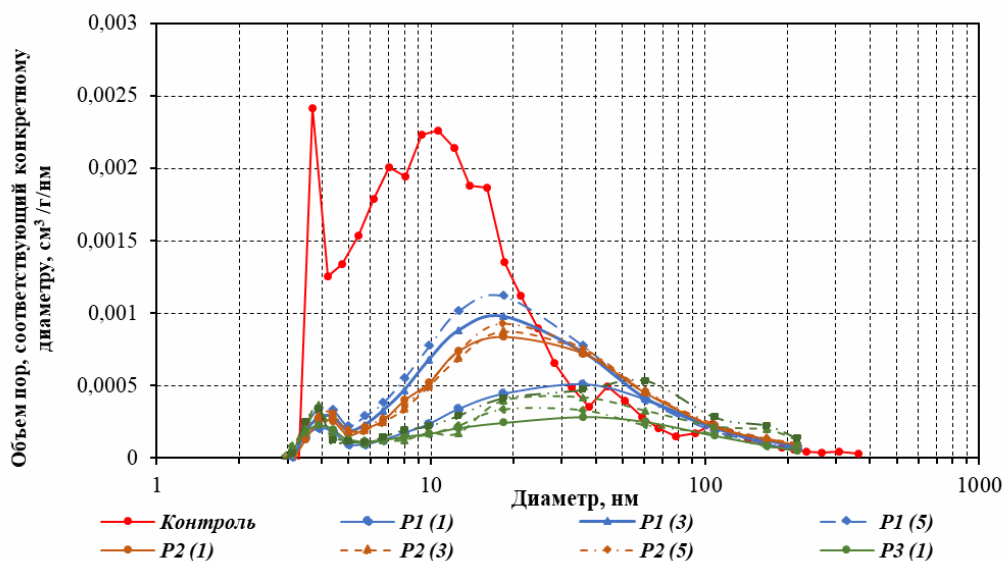


Рис. 3. Объем пор, соответствующий конкретному диаметру в зависимости от режима изготовления ЦГВ и длительности помола

Минимальным объемом пор вне зависимости от режима изготовления обладают ЦГВ после помола 1 минуту, при дальнейшем помоле в связи с ростом удельной поверхности происходит увеличение объема пор меньшего диаметра, что, вероятнее всего, связано с тем, что в процессе помола происходит дальнейшее разрушение частиц и оголение их внутренней пористости. Необходимо отметить, что характер нарастания объема пор в зависимости от режима изготовления меняется. Так, для ЦГВ, изготовленных по *P2*, объем пор меняется незначительно, что свидетельствует о том, что при увеличении длительности помола от 1 до 3 минут начинаются процессы агрегации, в то время как для ЦГВ, изготовленных по *P1*, наблюдается существенное увеличение объема пор от 1 до 3 минут помола. Таким образом, в случае ЦГВ, изготовленных по *P2*, максимальное увеличение удельной поверхности происходит уже после 1 минуты помола, в то время как для ЦГВ, изготовленных по *P1*, максимальный прирост удельной поверхности наступает ближе к 3 минутам помола. Незначительное изменение в объеме пор между 3 и 5 минутами помола может свидетельствовать о начале затухания процесса помола и начале процесса агрегации частиц.

Для ЦГВ, изготовленных по *P3*, характерно более сложное изменение графиков, характеризующих объем пор, в частности, после 15 минут помола наблюдается смещение преобладающего объема пор в сторону больших значений и изменение профиля графика, что может быть обусловлено не только агрегацией частиц, но и разным характером процесса помола частиц цитрогипса и ЦГВ. При этом меньшие

значения объема пор данного ЦГВ по отношению к ЦГВ, изготовленным по *P1* и *P2*, объясняется их большей удельной поверхностью (см. рис. 3).

Полученные результаты полностью согласуются с ранее сделанными выводами при анализе кинетики процессов помола.

3.4. Морфология частиц ЦГВ в зависимости от режима изготовления и длительности помола

Анализ морфологии частиц ЦГВ показал, что вне зависимости от режима изготовления с увеличением длительности помола размер частиц снижается (рис. 4), однако распределения частиц по размерам имеют различия.

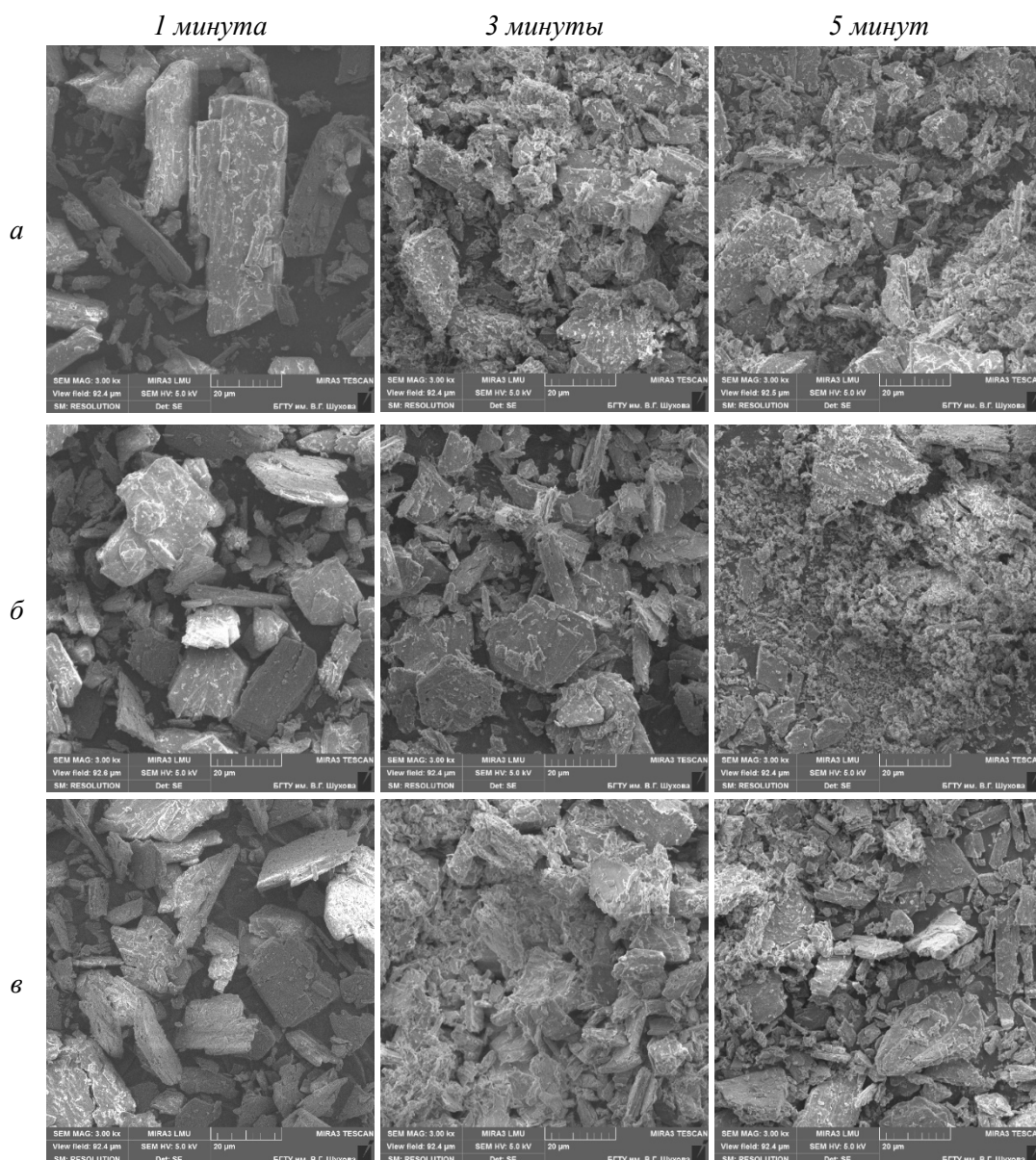


Рис. 4. Морфология частиц ЦГВ, изготовленного по *P1* (а), *P2* (б) и *P3* (в), в зависимости от длительности помола

Так, анализ морфологии частиц ЦГВ, изготовленных по режимам *P1* и *P2*, показал, что у первых (рис. 4, а), в отличие от вторых (рис. 4, б), наблюдается больший разброс частиц по размерам – на фоне крупных наблюдается существенное количество более мелких частиц. Такая разница согласуется с ранее полученными результатами и объясняет, почему при примерно равных значениях удельной поверхности (см. рис. 1)

ЦГВ, изготовленные по *P1*, отличаются большими значениями вязкости (табл. 1) и общим объемом пор (рис. 3) по отношению к ЦГВ, изготовленным по *P2*.

Также необходимо отметить, что анализ морфологии вяжущих, изготовленных по режиму *P3* (рис. 4, в), подтверждает ранее сделанные выводы о затухании процесса после 1 минуты помола и агрегации частиц: ЦГВ после 3 минут помола имеет в своем составе большее количество частиц меньшего размера, чем после 5 минут помола.

3.6. Морфология новообразований гипсового камня в зависимости от режима изготовления ЦГВ и длительности помола

Данные анализа морфологии новообразований гипсового камня (рис. 5) согласуются с результатами изменения предела прочности при сжатии гипсового камня в зависимости от режима изготовления и длительности помола ЦГВ (см. табл. 2, рис. 3). Так, в случае ЦГВ, изготовленного по *P1*, максимальной плотностью новообразований отличается гипсовый камень из вяжущего, молотого в течение 5 минут (рис. 5, *P1*, б); для ЦГВ, изготовленного по *P2* (рис. 5, *P2*, а) и *P3* (рис. 5, *P3*, а), – из ЦГВ, молотого в течение 3 минут.

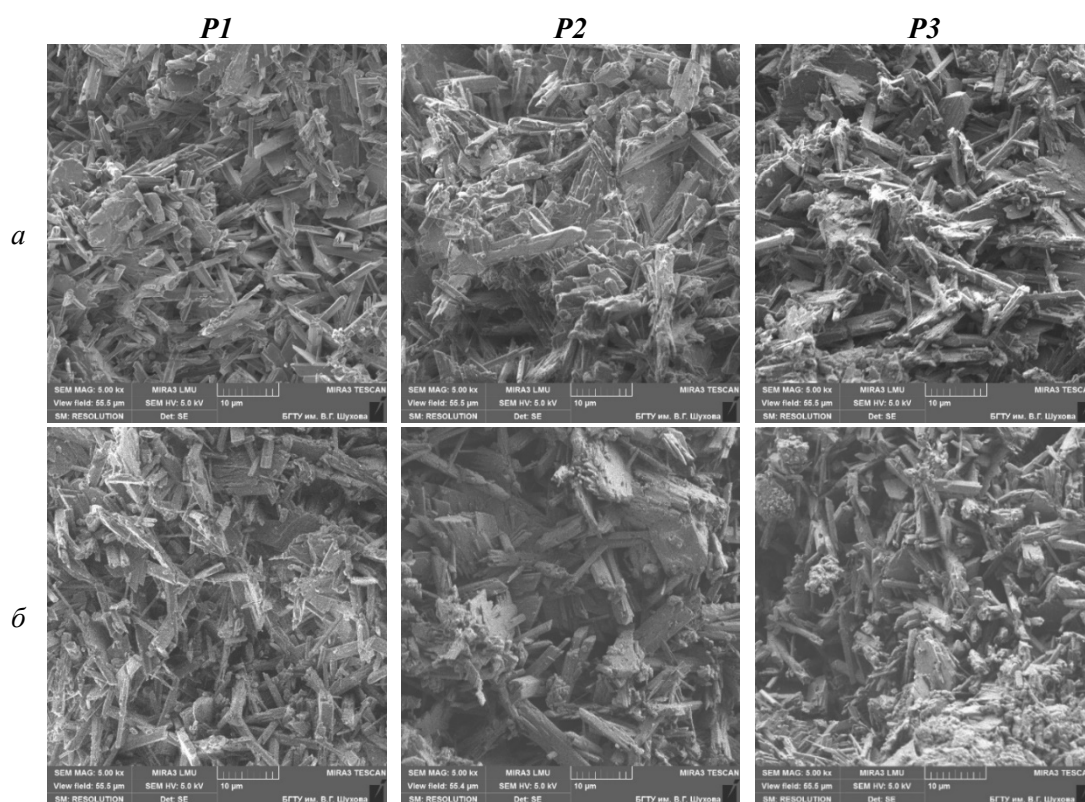


Рис. 5. Морфология частиц ЦГВ, изготовленного по *P1*, *P2* и *P3*, в зависимости от длительности помола:
а – 3 минуты; б – 5 минут

При этом необходимо отметить, что для гипсового камня из ЦГВ, изготовленного по *P1* (см. рис. 5), вне зависимости от длительности помола характерна более плотная структура, состоящая из удлиненных кристаллов, что, вероятнее всего, обусловлено наличием в данном вяжущем большего числа более мелких частиц по сравнению с вяжущими, изготовленными по *P2* и *P3* (см. рис. 4).

3.6. Характеристики цитрогипсового вяжущего

С целью определения влияния режимов изготовления ЦГВ и длительности помола на их марку (ГОСТ 125-2018) было проведено исследование ЦГВ немолотого, изготовленного по *P1*, молотого 5 минут, и изготовленного по *P2*, молотого 3 минуты (табл. 4) в соответствии с ГОСТ 125-2018.

Характеристики ЦГВ в соответствии с ГОСТ

Параметр	Значение в зависимости от режима изготовления ЦГВ					
	ЦГВ контроль		ЦГВ (P1(5))		ЦГВ (P2 (3))	
Нормальная густота, %	123		80		70	
Начало схватывания, мин	18	нормального твердения	11	нормального твердения	13	нормального твердения
Конец схватывания, мин	30		14		20	
Предел прочности при изгибе, МПа	0		3,2	Г6	2,8	Г5
Предел прочности при сжатии, МПа	0,3		6		5,5	

Из анализа полученных результатов видно, что помол вяжущего позволил существенно снизить показатели водопотребности ЦГВ, что, в свою очередь, положительно отразилось на их марке.

4. Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Помол способствует повышению качества цитрогипсовых вяжущих за счет снижения количества конгломератов в системе и пористости частиц, что, в свою очередь, положительно сказывается на водопотребности гипсового теста и, как следствие, прочности гипсового камня.

2. Режим изготовления оказывает существенное влияние как на кинетику изменения удельной поверхности цитрогипсовых вяжущих и их качественные характеристики, так и на физико-механические характеристики гипсового камня, что обусловлено различием кристаллических решеток $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и обезвоженной β -модификации полугидрата сульфата кальция.

3. С позиции технико-экономических показателей и физико-механических характеристик гипсового камня наиболее целесообразным является изготовление вяжущих из цитрогипса по *P1* с последующим помолом в течение 5 минут и по *P2* с последующим помолом 3 минуты; режим изготовления *P3* вне зависимости от длительности помола является нецелесообразным ввиду высокой технологичности и недостаточно высоких показателей предела прочности при сжатии гипсового камня.

5. Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка научных и технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий», FZWG-2021-0017.

The work was realized under support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project “Science and Universities”, research title is “Development of scientific and technological foundations for the creation of an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises”, FZWG-2021-0017.

Список литературы

1. Santana-Carrillo, J.L. Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate – Effect on properties and CO₂ emissions / J.L. Santana-Carrillo, O. Burciaga-Díaz, J.I. Escalante-García // Cement and Concrete Composites. – 2022. – Vol. 126. – 104364. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2021.104364

2. Bumanis, G. Environmental Benefit of Alternative Binders in Construction Industry: Life Cycle Assessment / G. Bumanis, A. Korjakins, D. Bajare // *Environments*. – 2022. – Vol. 9. – 6. – DOI:10.3390/environments9010006
3. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин [и др.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2020. – № 11. – С. 8–23. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
4. Cordon, H.C.F. Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil / H.C.F. Cordon, F.C. Cagnoni, F.F Ferreira // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – Vol. 22. – P. 504–512. – DOI:10.1016/j.jobbe.2019.01.010.
5. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
6. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin, Y. Cao, H. Guan [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 387. – 135858. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135858.
7. Production and resource utilization of flue gas desulfurized gypsum in China – A review / S. Liu, W. Liu, F. Jiao[et al.] // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 288. – 117799. – DOI:10.1016/j.envpol.2021.117799
8. Preparation of high-performance building gypsum by calcining FGD gypsum adding CaO as crystal modifier / J. Hao, G. Cheng, T. Hu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 306. – 124910. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124910.
9. Pirieva, S. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production / S. Pirieva, N. Alfimova, K. Levickaya // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2022. – 2(100). – 10007. – DOI:10.4123/CUBS.100.7.
10. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material / B. Ma, Z. Jin, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 234. – 117346. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117346
11. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in CaCl₂ solution / X. Li, Q. Zhang, Z. Shen [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – №511. – P.48–55. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027
12. Preparation of a-hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl₂ solution / W. Lu, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 214. – P. 399–412. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148
13. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste / M. Kamarou, N. Korob, W. Kwapinski [et al.] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – Vol. 100. – P. 324–332. – DOI:10.1016/j.jiec.2021.05.006
14. Получение вяжущих композиций для бетонов в центробежной помольной мельнице / Л.Х. Загороднюк, В.И. Уральский, А.В. Уральский [и др.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2019. – № 10. – С. 123–134. – DOI 10.34031/article_5db43db55dc701.66246266
15. Lesovik, V.S. Reduction of Energy Consumption in Manufacturing the Fine Ground Cement / V.S. Lesovik, N.I. Alfimova, P.V. Trunov // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9 (11). – P. 745–748. – DOI: 10.3923/rjasci.2014.745.748
16. Роль гранулометрии смешанных вяжущих в формировании их микроструктуры и прочности / Л. Х. Загороднюк, Д. С. Махортов, В. Д. Рыжих [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2021. – № 7. – С. 33–43. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43
17. Preparation of one-part alkali-activated nickel slag binder using an optimal ball milling process / X. Wang, W. Wu, L. Zhang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 322. – 125902. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125902.]
18. Temuujin, J. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature(Article) / J. Temuujin, R.P. Williams, A. van Riessen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, Iss.12-13. – P. 5276-5280. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016

19. Волженский, А.В. Гипсовые вяжущие и изделия / А.В. Волженский, А.В. Феронская. – М.: Стройиздат, 1974. – 238 с.

References

1. Santana-Carrillo, J.L. Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate – Effect on properties and CO₂ emissions / J.L. Santana-Carrillo, O. Burciaga-Díaz, J.I. Escalante-Garcia // *Cement and Concrete Composites*. – 2022. – Vol. 126. – 104364. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2021.104364
2. Bumanis, G. Environmental Benefit of Alternative Binders in Construction Industry: Life Cycle Assessment / G. Bumanis, A. Korjajins, D. Bajare // *Environments*. – 2022. – Vol. 9. – 6. – DOI:10.3390/environments9010006
3. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin [et al.] // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2020. – №11. – P.8–23. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
4. Cordon, H.C.F. Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil / H.C.F. Cordon, F.C. Cagnoni, F.F. Ferreira // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – Vol. 22. – P. 504–512. – DOI:10.1016/j.job.2019.01.010.
5. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
6. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin, Y. Cao, H. Guan [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 387. – 135858. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135858.
7. Production and resource utilization of flue gas desulfurized gypsum in China – A review / S. Liu, W. Liu, F. Jiao [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 288. – 117799. – DOI:10.1016/J.ENVPOL.2021.117799
8. Preparation of high-performance building gypsum by calcining FGD gypsum adding CaO as crystal modifier / J. Hao, G. Cheng, T. Hu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 306. – 124910. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124910.
9. Pirieva, S. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production / S. Pirieva, N. Alfimova, K. Levickaya // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2022. – 2(100). – 10007. – DOI:10.4123/CUBS.100.7.
10. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material / B. Ma, Z. Jin, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 234. – 117346. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117346
11. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in CaCl₂ solution / X. Li, Q. Zhang, Z. Shen [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – №511. – P.48–55. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027
12. Preparation of a-hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl₂ solution / W. Lu, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 214. – P. 399–412. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148
13. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste / M. Kamarou, N. Korob, W. Kwapinski [et al.] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – Vol. 100. – P. 324–332. – DOI:10.1016/j.jiec.2021.05.006
14. Obtaining binding compositions for concrete in a centrifugal grinding mill / L. Zagorodnyuk, V. Ural'skiy, A. Ural'skiy [et al.] // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2019. – No. 10. – P. 123–134. – DOI:10.34031/article_5db43db55dc701.66246266
15. Lesovik, V.S. Reduction of Energy Consumption in Manufacturing the Fine Ground Cement / V.S. Lesovik, N.I. Alfimova, P.V. Trunov // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9 (11). – P. 745–748. – DOI: 10.3923/rjas.2014.745.748
16. Role of granulometry of mixed binders in formation of their microstructure and strength / L. Zagorodnyuk, D.S. Mahortov, V. Ryzhikh [et al.] // *Bulletin of BSTU named*

after V.G. Shukhov. – 2021. – No. 7. – P. 33–43. – DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43.

17. Preparation of one-part alkali-activated nickel slag binder using an optimal ball milling process / X. Wang, W. Wu, L. Zhang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 322. – 125902. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125902.]

18. Temuujin, J. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature(Article) / J. Temuujin, R.P. Williams, A. van Riessen // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209 (12–13). – P. 5276-5280. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016

19. Volzhensky, A.V. Gypsum binders and products / A.V. Volzhensky, A.V. Ferron-skaya. – M.: Stroyizdat, 1974. – 238 p.

УДК 001.8:519.7:69

DOI 10.54734/20722958_2023_3_43

Московский политехнический университет
Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University

Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.

Budylna Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor of the
department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the department
«Mathematics and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

На примере разработки композиционных материалов как сложных многопараметрических систем, представимых конечным множеством математических моделей, отражающих конкретную группу свойств исходной системы, производится унификация системного подхода при решении конкретных практических задач. Подход, по существу, создает необходимую базу для работы с системами любой сложности независимо от их физической сущности с ограничениями на рамки определенной формализации.

Ключевые слова: сложные системы, композиты, управление свойствами, идентификация, оценка качества, критерии, формализация

SIMULATION MODELING OF COMPLEX SYSTEMS

Е.А. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

On the example of the development of composite materials as complex multi-parameter systems represented by a finite set of mathematical models that reflect a specific group of properties of the original system, the system approach in solving specific practical problems. The approach, in essence, creates the necessary basis for working with systems of any complexity, is unified regardless to their physical nature with restrictions on the scope of a certain formalization.

Keywords: complex systems, composites, property management, identification, quality assessment, criteria, formalization

Независимо от методов проектирования сложных систем их имитационное моделирование сводится к последовательному созданию и использованию целой совокупности математических моделей (рис. 1). Сначала производится *содержательное описание объекта моделирования*: определяется объект имитации и состав исходной информации, достаточной для изучения функционирования объекта; устанавливаются

границы применения и возможный список ограничений на модели при имитационном моделировании; определяются критерии эффективности для сравнительного анализа проектных вариантов системы. После этого осуществляется переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования с составлением *концептуальной модели* (выдвигаются гипотезы и фиксируются допущения, необходимые для построения имитационной модели; приводится список параметров и переменных модели; производится обработка результатов имитации и способы представления результатов). Далее осуществляется описание объекта в терминах принятых математических понятий с алгоритмизацией функционирования ее компонент (*формализованное представление объекта*: аппроксимация функциональных зависимостей, алгоритмическое описание процессов; представление в виде последовательностей формул и алгоритмов).

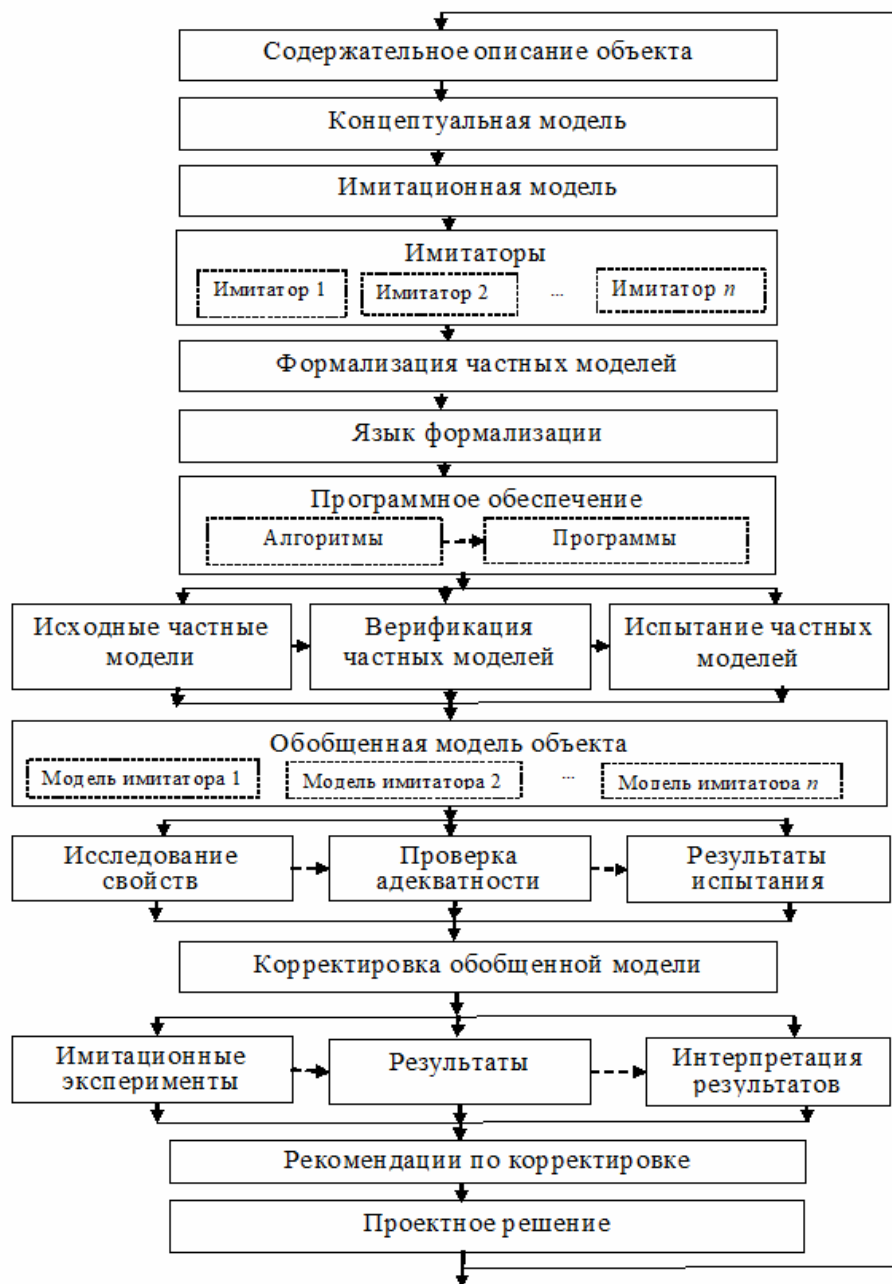


Рис. 1. К аналитическому конструированию сложных систем

Следующий шаг состоит в переходе от формального описания объекта к имитационной модели (модель разбивается на частные задачи с указанием приоритетов). После этого разрабатывается алгоритмическое и программное обеспечение. Наконец осуществляется проверка модели, оценка ее свойств (испытание и исследование обобщенной модели) с интерпретацией результатов моделирования и их использованием в ходе проектирования. При контроле правильности функционирования модели (после формализации объекта моделирования) используются и классические модели (фигурируют в обобщенной модели в виде составных частей), достоверность которых уже определена. Входами таких моделей являются данные, вычисляемые в других частях модели, достоверность которых проверяется. Проверка достоверности модели предполагает получение ответов на вопросы: позволяет ли модель решить поставленные задачи моделирования; насколько полна схема модели; отражается ли фактическое развитие процессов в реальной системе. Если результат работы классической модели будет не достоверным, то считается, что предшествующая часть формального описания также не достоверна. Проводится анализ всех функций моделей, чтобы убедиться в их отражении в формальном описании модели. При получении уравнений движения на основе анализа опытных данных должна проводиться проверка согласия с исходной информацией, по которой они получены. Для уравнений, полученных теоретическим путем, проводятся вычисления в контрольных точках для определения приемлемости результатов. Желателен анализ размерностей и масштабов переменных. При составлении имитационной модели и ее реализации особую роль играют декомпозиция объекта на составляющие и формирование элементов модели; отработка синхронизации компонент модели друг с другом в модельном времени; получение статистических данных; задание начальных условий; планирование процесса имитации отдельных вариантов системы; обработка результатов имитации. Очевидны сложность и трудоемкость решения этих задач: выполнение зависит от опыта и интуиции исследователя. Техническая задача на программирование осуществляется на основе описания имитационной модели. При автономной отладке блоков для каждого модуля предполагается создание и отладка имитаторов внешней среды. К моменту окончания комплексной отладки программы модели должны быть получены: описание имитационной модели, программы модели в выбранной системе программирования и ее полная схема; запись программы модели на языке моделирования, подтверждение достоверности программы, описание входных и выходных данных (размерности, масштабы, диапазоны изменения величин, затраты машинного времени на один цикл моделирования). Проверка адекватности модели предполагает проведение натурных экспериментов на реальной системе, в ходе которых получают контрольные результаты. Пока не существует общепринятой теории имитации [1...4]. Каждый исследователь полагается на свой собственный опыт и понимание особенностей объекта моделирования. Чувствительность имитационной модели определяется минимальным приращением критерия качества, вычисляемого по статистикам при последовательном варьировании параметров на всем диапазоне изменений.

Для иллюстрации рассмотрим строительные материалы, для которых изменение контролируемого параметра системы описывается решением $x(t)$ задачи Коши при начальных условиях $z(0) = -x_m$, $\dot{z}(0) = 0$ (определяется корнями характеристического уравнения $k_{1,2} = -\left(n \pm \sqrt{n^2 - \omega_0^2}\right) = -\lambda_{1,2}$, $\lambda_{1,2} \geq 0$). Уравнение

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + \omega_0^2 z = 0$$

эквивалентно

$$T^2 \ddot{z} + 2\xi T \dot{z} + z = 0; \quad T = \frac{1}{\omega_0}, \quad \xi T = \frac{n}{\omega_0^2}, \quad \xi = \frac{n}{\omega_0};$$

$n \geq \omega_0$ – корни действительные ($n = \omega_0$ – корни кратные);

$$\lambda_1 + \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_0, \quad \lambda_2 + \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_0, \quad r = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right)^2.$$

С увеличением ω_0 значения λ_2 и $\frac{1}{r} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ возрастают, а $\frac{1}{\lambda_2}$ и $r = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ убывают; при увеличении n значения λ_2 и $\frac{1}{r} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ убывают, а $\frac{1}{\lambda_2}$ и $r = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ возрастают.

Увеличение λ_2 ведет к уменьшению абсциссы t_n точки перегиба процесса $x(t)$ при значениях ξ , близких к 1. При $t \gg t_n$ процесс $x(t)$ определяется значением λ_2 . Таким образом, значение λ_2 должно находиться в некотором интервале: большие значения λ_2 могут привести к чрезмерно быстрому увеличению контролируемого параметра в начале процесса; малые значения λ_2 могут привести к чрезмерно длительному времени его выхода на эксплуатационное значение. Увеличение λ_2 (уменьшение t_n) соответствует увеличению ω_0 ; увеличение λ_2 ведет к постепенному переходу гетерогенной системы в гомогенную ($t_n = 0$), возможно, и с потерей необходимых свойств (гомогенная система является предельной для гетерогенной при $t_n \rightarrow 0$). Качество композиционного материала определяется и значением λ_1 (или $r = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$), которое также должно лежать в определенном диапазоне.

Оценка качества композиционного материала нами производилась по функционалу:

$$\begin{aligned} \Phi(S) &= f \cdot \lambda_2 + a \cdot \frac{1}{\lambda_2} + b r + c \cdot \frac{1}{r}, \\ \Phi(S) &= \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \cdot \omega_0 + \frac{a}{\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \cdot \omega_0} + \\ &+ b \cdot \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} + c \cdot \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}. \end{aligned}$$

Здесь f, a, b, c – весовые константы. Границы областей D_k равных оценок качества композиционного материала определяются как линии уровня $\Phi = \Phi(\xi, \omega_0) = d_k = \text{const}$, а области D_k – двойными неравенствами

$$d_{k-1} \leq \Phi(S) < d_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N,$$

где N – балльность шкалы; k – класс (оценка качества) композиционного материала в баллах в выбранной шкале.

Выбором ω_0 и n всегда можно отнести рассматриваемую систему к требуемому классу, определяемому функционалом $\Phi(S)$.

Если ω_0 и n мало связаны между собой, то улучшение качества материала можно осуществить с использованием направления вектора-градиента $\text{grad } \Phi(\xi, \omega_0) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi}, \frac{\partial \Phi}{\partial \omega_0} \right)$,

а именно, класс системы улучшается при движении в антиградиентном направлении.

Связь характеристик материала с параметрами модели определялась экспериментально. Так, при синтезе материала на основе Вольского ПЦ 400 Д-20 с суперпластификатором С-3 (товарного, легкой и тяжелой фракций) из условия обеспечения

требуемой кинетики набора прочности параметрическая идентификация сводилась к определению одной из совокупностей (t_n, λ_2, x_m) , (ξ_n, ω_0, x_m) , $(\lambda_1, \lambda_2, x_m)$, (ω_0, n, x_m) . Значения x_m, t_n, λ_2 определялись по экспериментальным зависимостям $x(t)$.

В результате уточнения значений параметров из условий обеспечения адекватности модели и процесса $x(t)$ получили $x_m = 0,85$; $t_n = 2,8$; $\lambda_2 = 0,77$; $\lambda_1 = 0,77$; $\xi = 1,81$; $\omega_0 = 0,232$; $n = 0,42$. Оценка качества материала с точки зрения кинетики набора прочности с использованием функционала $\Phi(S)$ дала балльную оценку $\Phi(S) = 6,36$. Улучшение класса системы осуществлялось с использованием направления $\mathbf{grad} \Phi$ (направляющий вектор нормали к линии уровня $\Phi(S) = 6,36$, проходящей через точку $M_0(1,81; 0,232)$: $\omega_0 - 0,232 = -5(\xi - 1,81)$). Для улучшения класса системы следует уменьшить ξ . Тогда, задав шаг $\Delta \xi$, найдем соответствующее изменение $\Delta \omega_0$ из условия, чтобы точка $M_1(\xi + \Delta \xi; \omega + \omega_0)$ лежала на нормали со стороны вектора $-\mathbf{grad} \Phi$. Задача синтеза композиционного материала с точки зрения получения оптимальных параметров кинетических процессов с применением областей равных оценок решается полностью [5, 6].

Фактически получили единую концепцию имитационного моделирования сложных технических систем на основе развития теоретических основ классического аппарата имитационного моделирования с унификацией методов системных исследований в области проектного моделирования, систем с вероятностными параметрами их функционирования по конечному множеству математических моделей.

Список литературы

1. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
2. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
3. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18. – № 2. – P. 95.
4. Гарькина, И.А. Проблема многокритериальности при управлении качеством сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2 (41). – С. 123–129.
5. Соколова, Ю.В. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего / Ю.В. Соколова, А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев, А.А. Чибисов // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 27–36.
6. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 48–53.

References

1. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of the qualitative description and statistical reliability of the quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.
2. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.

3. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18. – № 2. – P. 95.
4. Garkina, I.A. The problem of multi-criteria in the quality management of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // World of Transport and Technological Machines. – 2013. – № 2 (41). – P. 123–129.
5. Sokolova, Yu.V. Evaluation of the influence of prescription factors on the structure formation of a polymer-organic binder / Yu.V. Sokolova, A.M. Aizenshtadt, E.V. Korolev, A.A. Chibisov // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 27–36.
6. Budylna, E.A. System research in materials science / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 4 (49). – P. 48–53.

УДК 691.327:539.4

DOI 10.54734/20722958_2023_3_49

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Макридин Николай Иванович,**
доктор технических наук,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора**Максимова Ирина Николаевна,**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Makridin Nikolai Ivanovich,**
Doctor of Sciences, Chief Researcher of the
research sector**Maksimova Irina Nikolaevna,**
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Quality Management and
Construction Production Technology»
E-mail: maksimovain@mail.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Представлены результаты обобщающего сравнительного анализа кинетических зависимостей процессов структурообразования и конструкционной прочности цементных композитов на ранних и поздних стадиях гидратационного твердения на большом массиве экспериментальных авторских данных во временном диапазоне до 18 лет. Получены более строгие феноменологические модели механических свойств, которые могут быть положены в основу рецептурно-технологической оптимизации структуры и прогнозирования длительной конструкционной прочности цементных гетерогенных дисперсных систем и закономерностей процессов их структурообразования и твердения.

Ключевые слова: цементный композит, ускоряюще-пластифицирующая добавка, структурообразование, твердение, прочность, конструктивные и деструктивные процессы

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF CRITERIA FOR LONG-TERM STRENGTH OF CEMENT COMPOSITES

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The results of a generalizing comparative analysis of kinetic dependences of the processes of structure formation and structural strength of cement composites at early and late stages of hydration hardening on a large array of experimental author's data in the time range up to 18 years are presented. More rigorous phenomenological models of mechanical properties have been obtained, which can be used as a basis for compounding and technological optimization of the structure and prediction of long-term structural strength of cement heterogeneous dispersed systems and the regularities of their structure formation and hardening processes.

Keywords: cement composite; accelerating-plasticizing additive; structure formation; hardening; strength; constructive and destructive processes

Как известно, создание строительных конструкционных материалов на основе цементных дисперсных систем с заданными свойствами является основной задачей современного строительного материаловедения, которая может быть решена только при разработке технологических процессов в комплексе с физико-химическими и физико-механическими воздействиями, лежащими в основе целенаправленного регулирования и управления гетерогенностью микро- и макроструктур цементных дисперсных систем, с учетом основополагающих материаловедческих принципов разработки материалов [1]: когерентности, или соответствия, оптимальной дисперсности, гомо-

генности и предельного уплотнения, – позволяющих управлять структурообразованием цементных композитов.

Проблема нарастания и регулирования конструкционной прочности цементной дисперсной системы во времени по своей практической значимости остается в центре внимания как отечественных, так и зарубежных исследователей. Однако в публикациях по этой проблеме в основном рассматриваются ранние стадии процессов гидратационного структурообразования и твердения, что же касается поздних стадий, то, как отмечено в работе [2], существует давно сложившееся мнение, что регулирование свойств цементного камня в этот период практически невозможно, хотя в этом имеется необходимость.

В современных условиях поиска путей получения и использования в строительстве бетонов нового поколения (БНП), в том числе высокофункциональных, с очень высокими показателями прочности, однородности и низкой пористости, в основу получения которых положена новая концепция бетоноведения – получение высокоподвижной матричной фазы бетонной смеси, проблема длительной конструкционной прочности БНП приобретает особый научный и практический интерес с позиций как выбора технологической и физико-химической оптимизации структуры, так и прогнозирования свойств композита.

В исследованиях проф. С.А. Миронова с соавторами [3, 4] отмечается, что волнообразные изменения прочности во времени по восходящей линии являются не случайным, а закономерным явлением, обусловленным возникновением внутренних напряжений, снижающих прочность цементного камня от непрерывно идущей гидратации вяжущего, а также от перекристаллизационных процессов, обусловленных изменением фазового состава новообразований с переходом нестабильных соединений в более стабильные. В работе [5] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания прочности во времени (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств – ростом деформаций во времени, приводящем к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микро- и макроуровнях. По М.М. Сычеву [6], одной из многих причин «пилообразного» характера изменения прочности «зрелого» бетона во времени является гидролиз связей $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, на долю которых приходится до 50–60 % прочности цементного камня.

Обобщение результатов исследований [7–12], в том числе собственных [13–16], позволяет констатировать, что наиболее рациональным способом регулирования структуры и свойств бетонов конструкционного назначения является модифицирование композиционных смесей химическими добавками пластифицирующего действия, а изучение природы механических свойств строительных материалов с позиций механики деформируемого твердого тела (МДТТ) и структурной механики разрушения материалов [17–21] вызывает настоятельную необходимость широкого внедрения в исследовательскую практику при разработке и создании материалов новых научных принципов комплексной оценки силовых, деформационных и энергетических критериев конструкционной прочности с получением феноменологических математических моделей этих свойств. Это и являлось целью и задачей нашего исследования по изучению характера изменения длительной прочности модифицированных и немодифицированных структур цементных бетонов, полученных при механических испытаниях опытных образцов сравниваемых серий и испытанных в разные сроки во временном диапазоне 6580 суток (18 лет) по методике ГОСТ 29167-2021 на образцах типа I с применением метода акустической эмиссии, позволяющего изучать кинетику разрушения образцов в реальном масштабе времени [14].

Для изготовления сравниваемых опытных образцов использовали два вида портландцемента (ПЦ): Старооскольский ПЦ М500–Д0 с нормальной плотностью 0,257 и Вольский ПЦ М500–Д20 с нормальной плотностью 0,285, минеральную пуццолановую добавку на основе опоки. В качестве модификатора бетонной смеси использовали

химическую добавку ПДО-М, которая является комплексной ускоряюще-пластифицирующей добавкой, приготовленной на основе отходов предприятий ПО «Марбиофарм». Основными компонентами добавки являются сульфат натрия – отход производства аскорбиновой кислоты, действующий как ускоритель твердения, и последрожжевой остаток от производства кормовых дрожжей, действующий как пластификатор [22, 23].

Для изготовления опытных образцов-призм типа I по ГОСТ 29167-91 размером 40×40×160 мм использовали также Сурский речной песок, $M_{кр} = 1,63$, высокопрочный гранитный щебень фракции 5–10 мм. На каждом виде ПЦ было изготовлено по 25 сравнительных серий образцов одинакового состава с одинаковой удобоукладываемостью, твердевших в одинаковых условиях.

В табл. 1 и 2 приведены значения расхода, показателей удобоукладываемости, соответствующие им В/Ц отношения и режимы ТВО.

Т а б л и ц а 1

Технологические и физико-химические факторы оптимизации структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500–Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Образцы серии	Расход материалов на 1 м ³ , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО- М, % от массы Ц				
1в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+7,4+3	77	570
2в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+7,4+3	77	570
3в	481	615	1100	216	0,3	0,45	12+2+7,4+3	77	570
4в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+7,4+3	77	570
5в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+4,6+3	77	354
6в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+4,6+3	77	354
7в	481	615	1100	216	0,3	0,45	12+2+4,6+3	77	354
8в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+4,6+3	77	354
9в	481	615	1100	216	1,7	0,45	12+2+7,4+3	63	466
10в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
11в	481	615	1100	207	0,3	0,43	12+2+7,4+3	63	466
12в	289	932	1100	214	0,3	0,741	12+2+7,4+3	63	466
13в	481	615	1100	216	1,7	0,45	12+2+4,6+3	63	290
14в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
15в	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
16в	289	932	1100	214	0,3	0,74	12+2+4,6+3	63	290
17в	520	497	1100	201	1,0	0,386	12+2+6+3	70	420
18в	250	917	1100	190	1,0	0,76	12+2+6+3	70	420
19в	385	774	1100	171	2,0	0,445	12+2+6+3	70	420
20в	385	774	1100	229	0,0	0,595	12+2+6+3	70	420
21в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+8+3	70	560
22в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+4+3	70	280
23в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	80	480
24в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	60	360
25в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	70	420

Технологические и физико-химические факторы оптимизации структуры
и параметров конструкционной прочности цементных композитов
на портландцементе марки М500–Д0 (ПО «Осколцемент»)

Образцы серии	Расход материалов на 1 м ³ , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО- М, % от массы Ц				
1с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+7,4+3	77	570
2с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+7,4+3	77	570
3с	481	615	1100	201	0,3	0,419	12+2+7,4+3	77	570
4с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	77	570
5с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+4,6+3	77	354
6с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+4,6+3	77	354
7с	481	615	1100	201	0,3	0,419	12+2+4,6+3	77	354
8с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	77	354
9с	481	615	1100	216	1,7	0,449	12+2+7,4+3	63	466
10с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
11с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
12с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	63	466
13с	481	615	1100	216	1,7	0,449	12+2+4,6+3	63	290
14с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
15с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+4,6+3	63	290
16с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	63	290
17с	520	497	1100	164	1,0	0,315	12+2+6+3	70	420
18с	250	917	1100	194	1,0	0,776	12+2+6+3	70	420
19с	385	774	1100	171	2,0	0,444	12+2+6+3	70	420
20с	385	774	1100	207	0,0	0,538	12+2+6+3	70	420
21с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+8+3	70	560
22с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+4+3	70	280
23с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	80	480
24с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	60	360
25с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	70	420

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что при получении бетонной смеси постоянной удобоукладываемости на Старооскольском ПЦ с использованием добавки ПДО-М можно добиться сокращения расхода воды на 11–18 %, что позволит отнести ПДО-М к водоредуцирующей добавке второй группы по ГОСТ 24211–2003, в бетонных же смесях на основе Вольского ПЦ ПДО-М уменьшается расход воды на 23–25 %, что дает основание отнести ПДО-М в этом случае к водоредуцирующей добавке первой группы. Изменение водоредуцирующей способности добавки ПДО-М на сравниваемых цементах, вероятнее всего, обусловлено наличием минеральной добавки.

Исходя из цели и задач исследования, в соответствии с ведущей научной концепцией работы, сформулированной выше, были проведены обширные эксперименты по изучению влияния технологических и физико-химических факторов на оптимизацию структуры и трещиностойкости цементных композитов нового поколения с позиций структурной механики разрушения материалов по методике ГОСТ 29167-2021 на образцах типа I с комплексной оценкой на каждом опытном образце следующих параметров их механического поведения при неравновесных механических испытаниях потери устойчивости процесса деформирования образца: R_{bif} – прочность на растяжение при изгибе и $R_{сж}$ – прочность на сжатие на половинках образца после испытаний на растяжение при изгибе.

Комплексная методология оценки структурно-механических параметров конструкционной прочности гидратных структур позволяет получать новые более дифференцированные характеристики, отражающие синергетические эффекты взаимовлияния конструкционных и деструктивных процессов структурообразования и твердения цементных дисперсных систем, обусловленных концентрацией и качественными показателями (крупности, удельной поверхности, состояния шероховатости поверхности) дисперсной фазы цементных композитов, позволяющими более надежно судить о механическом поведении материала под нагрузкой, что, в свою очередь, позволяет переходить от простого определения параметров качества к активному управлению качеством материала.

Комплексная оценка на каждом опытном образце совокупности показателей параметров длительной конструкционной прочности на ранней стадии структурообразования и твердения бетонов в возрасте 90 суток и поздней стадии – в возрасте 6570 суток (18 лет), сравниваемых в исследовании серий образцов, позволила получить обширный экспериментальный материал для сравнительного анализа и получения кинетических зависимостей процессов структурообразования и твердения, позволяющих обосновывать новые подходы к проблеме прочности и механического поведения конструкционных материалов на диаграмме неравновесного нагружения по методике ГОСТ 29167-2021, в основу которых положено детальное изучение самого процесса разрушения в реальном масштабе времени с помощью метода акустической эмиссии, понимание которого дает возможность не только выявлять параметры материала, определяющие его силовые и энергетические характеристики трещиностойкости, но и знать эти параметры, чтобы использовать их при проектировании гетерогенных цементных систем с повышенной трещиностойкостью.

Результаты комплексной оценки совокупности показателей параметров конструкционной прочности на ранних и поздних стадиях структурообразования и твердения цементных композитов сравниваемых серий приведены в табл. 3–6.

Т а б л и ц а 3

Сводная ведомость изменения прочности на растяжение при изгибе R_{bf} образцов бетона на вольском портландцементе марки М500–Д20 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № пп	Прочность на растяжение при изгибе R_{bf} , МПа			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
1в	6,4	7,16 / 1,12	7,18 / 1,00	11,73 / 1,64
2в	4,3	4,25 / 0,99	4,63 / 1,09	6,43 / 1,4
3в	6,18	7,0 / 1,13	6,69 / 0,96	11,32 / 1,62
4в	3,37	3,74 / 1,11	4,12 / 1,1	5,04 / 1,36
5в	6,68	7,74 / 1,16	8,23 / 1,06	11,32 / 1,47
6в	3,62	4,62 / 1,27	4,86 / 1,08	6,94 / 1,51
7в	6,0	7,74 / 1,29	7,79 / 1,01	11,32 / 1,47
8в	2,81	3,58 / 1,27	4,12 / 1,15	4,63 / 1,29
9в	5,9	8,8 / 1,49	7,74 / 0,88	10,8 / 1,23
10в	3,05	5,05 / 1,65	5,14 / 1,02	5,92 / 1,16
11в	5,94	8,65 / 1,45	7,20 / 0,83	12,4 / 1,44
12в	2,59	4,41 / 1,7	3,6 / 0,82	10,2 / 2,31
13в	5,94	8,19 / 1,38	6,96 / 0,85	10,29 / 1,25
14в	2,54	4,79 / 1,88	5,92 / 1,24	7,72 / 1,61
15в	5,67	8,24 / 1,45	7,72 / 0,94	10,9 / 1,33
16в	2,08	3,95 / 1,9	3,86 / 0,98	6,79 / 1,7
17в	7,12	8,55 / 1,2	9,26 / 1,08	10,8 / 1,26
18в	1,81	4,23 / 2,33	4,63 / 1,09	5,0 / 1,19

1	2	3	4	5
19в	4,52	6,93 / 1,53	5,56 / 0,8	11,83 / 1,71
20в	4,11	5,56 / 1,35	6,17 / 1,11	9,81 / 1,75
21в	3,92	6,62 / 1,69	7,2 / 1,09	10,8 / 1,64
22в	4,03	6,92 / 1,7	6,94 / 1,00	9,88 / 1,43
23в	3,8	5,17 / 1,36	6,02 / 1,16	9,26 / 1,78
24в	4,42	7,39 / 1,67	7,2 / 0,97	10,3 / 1,39
25в	3,92	6,92 / 1,76	7,2 / 1,04	10,4 / 1,51
$\sum \bar{R}_{btf}$	4,43	6,29 / 1,42	6,24 / 0,99	9,27 / 1,474

П р и м е ч а н и е . В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Т а б л и ц а 4

Сводная ведомость изменения прочности на растяжение при изгибе R_{btf} образцов бетона на старооскольском портландцементе марки М500–Д0 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № пп	Прочность на растяжение при изгибе R_{btf} , МПа			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570
1с	6,74	8,14 / 1,21	7,63 / 0,94	10,85 / 1,33
2с	4,19	5,17 / 1,23	5,75 / 1,11	5,14 / 0,99
3с	5,61	6,86 / 1,22	7,32 / 1,07	9,82 / 1,43
4с	2,43	3,13 / 1,29	4,18 / 1,34	5,12 / 1,64
5с	6,22	8,45 / 1,36	8,36 / 0,99	11,83 / 1,4
6с	3,24	5,07 / 1,56	4,7 / 0,93	6,02 / 1,19
7с	5,0	6,84 / 1,37	6,74 / 0,99	10,54 / 1,54
8с	1,58	3,12 / 1,97	4,18 / 1,34	5,4 / 1,73
9с	3,36	7,74 / 2,3	8,15 / 1,053	10,13 / 1,31
10с	2,33	3,7 / 1,59	4,18 / 1,13	5,68 / 1,54
11с	4,88	7,47 / 1,53	7,47 / 1,0	10,29 / 1,38
12с	1,31	3,76 / 2,87	3,4 / 0,9	4,12 / 1,1
13с	4,92	7,5 / 1,52	7,16 / 0,95	10,29 / 1,37
14с	2,27	3,99 / 1,75	5,33 / 1,34	6,17 / 1,55
15с	4,04	6,34 / 1,57	7,94 / 1,25	10,8 / 1,7
16с	1,6	3,4 / 2,12	3,14 / 0,92	3,6 / 1,06
17с	5,48	8,82 / 1,61	8,88 / 1,007	6,43 / 0,73
18с	1,78	3,05 / 1,71	3,71 / 1,22	5,66 / 1,86
19с	3,92	6,1 / 1,55	3,92 / 0,64	10,29 / 1,69
20с	2,94	5,25 / 1,78	6,48 / 1,23	10,03 / 1,91
21с	3,29	5,07 / 1,54	4,99 / 0,98	8,05 / 1,59
22с	3,14	5,93 / 1,89	6,61 / 1,12	10,81 / 1,82
23с	3,92	5,58 / 1,42	5,64 / 1,01	9,26 / 1,66
24с	4,31	7,23 / 1,67	6,24 / 0,86	10,27 / 1,42
25с	3,44	5,85 / 1,7	4,96 / 0,85	10,29 / 1,76
$\sum \bar{R}_{btf}$	3,68	5,74 / 1,56	5,88 / 1,024	8,28 / 1,44

П р и м е ч а н и е . В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты –

коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Т а б л и ц а 5

Сводная ведомость изменения прочности на сжатие $R_{сж}$ образцов бетона на вольском портландцементе марки М500–Д20 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570
1в	48,0	60,65 / 1,26	67,3 / 1,11	88,7 / 1,46
2в	19,75	27,4 / 1,39	29,4 / 1,07	45,3 / 1,65
3в	43,9	55,8 / 1,27	62,5 / 1,12	85,0 / 1,52
4в	17,45	22,8 / 1,3	25,2 / 1,1	33,9 / 1,49
5в	47,95	61,75 / 1,29	70,0 / 1,13	91,6 / 1,48
6в	18,4	22,55 / 1,23	29,3 / 1,3	43,2 / 1,92
7в	42,35	55,9 / 1,32	60,8 / 1,09	86,6 / 1,55
8в	16,7	23,0 / 1,38	23,2 / 1,01	26,6 / 1,16
9в	39,9	62,4 / 1,56	68,3 / 1,09	98,4 / 1,58
10в	12,65	24,9 / 1,97	28,2 / 1,13	37,2 / 1,49
11в	36,6	60,4 / 1,65	67,0 / 1,11	95,0 / 1,57
12в	12,0	24,0 / 2,0	26,7 / 1,11	94,9 / 3,95
13в	30,8	60,5 / 2,0	65,7 / 1,09	102,0 / 1,69
14в	10,1	24,05 / 2,38	29,7 / 1,23	41,1 / 1,71
15в	30,15	58,0 / 1,92	68,4 / 1,18	104,4 / 1,8
16в	9,2	23,4 / 2,54	28,0 / 1,2	40,0 / 1,71
17в	44,5	71,3 / 1,6	77,0 / 1,08	107,1 / 1,5
18в	10,0	20,65 / 2,06	24,0 / 1,16	35,0 / 1,69
19в	22,44	42,95 / 1,91	48,3 / 1,12	64,8 / 1,51
20в	17,7	38,1 / 2,15	45,2 / 1,19	72,0 / 1,89
21в	23,35	43,5 / 1,86	51,9 / 1,19	94,9 / 2,18
22в	20,16	41,8 / 2,07	45,7 / 1,09	74,0 / 1,77
23в	22,75	40,3 / 1,77	44,6 / 1,11	75,0 / 1,86
24в	19,95	43,7 / 2,19	47,4 / 1,08	70,3 / 1,61
25в	25,1	44,05 / 1,75	49,8 / 1,13	82,6 / 1,87
$\sum \bar{R}_{сж}$	25,67	41,75 / 1,626	47,34 / 1,134	71,58 / 1,714

П р и м е ч а н и е . В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Сводная ведомость изменения прочности на сжатие $R_{сж}$ образцов бетона на старооскольском портландцементе марки М500–Д0 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № пп	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570
1с	48,85	65,6 / 1,34	73,2 / 1,12	92,7 / 1,41
2с	17,86	27,15 / 1,52	30,3 / 1,12	44,6 / 1,64
3с	35,9	52,95 / 1,47	59,7 / 1,13	82,2 / 1,55
4с	10,48	17,6 / 1,68	19,1 / 1,08	34,9 / 1,98
5с	39,2	62,95 / 1,6	70,6 / 1,12	98,4 / 1,56
6с	12,96	26,15 / 2,02	31,2 / 1,19	41,2 / 1,58
7с	26,5	50,05 / 1,89	59,6 / 1,19	86,2 / 1,72
8с	6,7	17,15 / 2,6	21,3 / 1,24	34,9 / 2,03
9с	30,75	50,0 / 1,63	54,5 / 1,09	88,0 / 1,76
10с	10,2	21,15 / 2,07	23,2 / 1,1	38,9 / 1,84
11с	23,4	43,8 / 1,87	52,0 / 1,19	76,8 / 1,75
12с	7,1	16,45 / 2,32	19,5 / 1,18	29,3 / 1,78
13с	30,0	50,3 / 1,68	56,9 / 1,13	88,9 / 1,77
14с	9,65	19,4 / 2,01	24,7 / 1,27	39,4 / 2,03
15с	21,73	41,75 / 1,92	50,1 / 1,2	89,4 / 2,14
16с	6,8	14,75 / 2,17	16,5 / 1,12	33,8 / 2,29
17с	41,2	64,95 / 1,58	78,0 / 1,2	93,0 / 1,43
18с	7,85	16,7 / 2,13	21,2 / 1,27	34,8 / 2,08
19с	18,1	40,3 / 2,23	37,0 / 0,92	66,4 / 1,65
20с	16,35	29,3 / 1,79	40,1 / 1,37	73,6 / 2,51
21с	17,6	33,1 / 1,88	39,5 / 1,19	76,1 / 2,03
22с	14,65	32,1 / 2,19	38,0 / 1,18	79,4 / 2,47
23с	21,45	33,9 / 1,58	36,0 / 1,06	69,3 / 2,04
24с	18,7	40,05 / 2,14	48,5 / 1,21	72,1 / 1,8
25с	16,15	33,04 / 2,05	36,1 / 1,09	77,4 / 2,34
$\sum \bar{R}_{сж}$	20,405	36,026 / 1,765	41,472 / 1,151	65,668 / 1,823

П р и м е ч а н и е . В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Сравнительный анализ численных значений прочности R_{btf} и $R_{сж}$ на двух видах портландцемента в рассматриваемом диапазоне времени гидратационного твердения с учетом влияния технологических и физико-химических факторов показывает заметное влияние вида портландцемента на значения R_{btf} и $R_{сж}$ как на ранних, так и на поздних стадиях структурообразования и твердения опытных образцов сравниваемых серий.

Так, в первом приближении оценка значений прочности R_{btf} и $R_{сж}$ сравниваемых серий образцов в контрольные сроки после ТВО по средней величине $\bar{R}_{btf}$ и $\bar{R}_{сж}$ из 25 серий опытных составов позволяет сформулировать следующие положения.

По характеру изменения средних значений R_{btf} и $R_{сж}$ сравниваемых серий опытных образцов (экспериментальные данные табл. 3–6) следует отметить, что $\bar{R}_{btf}$ после

ТВО на портландцементе М500–Д0 составляла 3,68 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – соответственно 4,43 МПа, что соответствовало увеличению на 20,4 %. $\bar{R}_{сж}$ после ТВО на портландцементе М500–Д0 составляла 20,4 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 25,67 МПа, что соответствовало увеличению на 25,8 %.

В возрасте 28 суток $\bar{R}_{btf}$ на портландцементе М500–Д0 составляла 5,74 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 6,25 МПа, что соответствовало увеличению $\bar{R}_{btf}$ на 9,0 %. $\bar{R}_{сж}$ в возрасте 28 суток на портландцементе М500–Д0 составляла 36,0 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 42,15 МПа, что соответствовало увеличению на 17,0 %.

В возрасте 90 суток, отражающем раннюю стадию структурообразования и твердения сравниваемых серий бетона, $\bar{R}_{btf}$ на портландцементе М500–Д0 составляла 5,88 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 6,24 МПа, что соответствовало увеличению $\bar{R}_{btf}$ на 6,1 %. $\bar{R}_{сж}$ в возрасте 90 суток на портландцементе М500–Д0 составляла 41,47 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 47,34 МПа, что соответствовало увеличению на 14,2 %.

Наконец, в возрасте бетона сравниваемых серий образцов 6570 суток (18 лет), соответствующем поздней стадии структурообразования и твердения сравниваемых серий бетона, $\bar{R}_{btf}$ на портландцементе М500–Д0 составляла 8,28 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 9,27 МПа, что соответствовало увеличению $\bar{R}_{btf}$ на 12 %. $\bar{R}_{сж}$ в возрасте 18 лет на портландцементе М500–Д0 составляла 65,67 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 71,58 МПа, что соответствовало увеличению $\bar{R}_{сж}$ на 9,0 %.

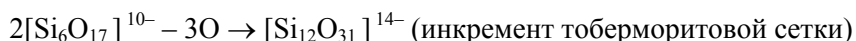
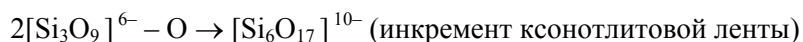
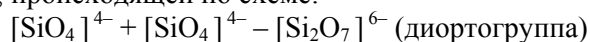
Что касается кинетики роста средних значений $\bar{R}_{btf}$ и $\bar{R}_{сж}$ в контрольные сроки ранней и поздней стадий структурообразования и твердения, то следует отметить, что прочность $\bar{R}_{btf}$ после ТВО до 90 суток на портландцементе М500–Д0 росла на 59,8 % соответственно, а на портландцементе М500–Д20 – на 40,9 %. А с возраста бетона от 90 суток до 18 лет $\bar{R}_{btf}$ росла на портландцементе М500–Д0 с 5,88 до 8,28 МПа, то есть на 40,8 %, а на портландцементе М500–Д20 росла с 6,24 до 9,27 МПа, то есть на 48,6 % соответственно.

Средняя прочность $\bar{R}_{сж}$ после ТВО до 90 суток на портландцементе М500–Д0 росла соответственно с 20,4 до 41,47 МПа, то есть на 103 %, а на портландцементе М500–Д20 – с 25,67 до 47,3 МПа, то есть на 84,3 %. А с возраста бетона от 90 суток до 18 лет $\bar{R}_{сж}$ росла на портландцементе М500–Д0 с 41,47 до 65,67 МПа, то есть на 58,4 %, а на портландцементе М500–Д20 $\bar{R}_{сж}$ росла соответственно с 47,34 до 71,58 МПа, то есть на 51,2 %.

В целом анализ сравниваемых серий опытных образцов на двух видах портландцемента по характеру изменения средних значений прочности $\bar{R}_{btf}$ и $\bar{R}_{сж}$ в принятые сроки ранней и поздней стадий структурообразования и твердения, а также по кинетике роста средних значений $\bar{R}_{btf}$ и $\bar{R}_{сж}$ позволяет отдать предпочтение рассматриваемым характеристикам качества опытных образцов на портландцементе М500–Д20 ПО «Вольскцемент».

Как известно, трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) и β -двухкальциевый силикат $\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($\beta - \text{C}_2\text{S}$) являются основными минералами портландцементного клинкера и определяют его важнейшие свойства. Эти минералы – соединения неустойчивые, образованные слабой поликремниевой кислотой и не очень сильным основанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Поэтому они при взаимодействии с водой подвергаются полному гидролизу. Образующаяся при этом химически более активная поликремниевая

кислота взаимодействует с водой и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Структура поликремниевой кислоты – пространственная сетка, структурной единицей которой является тетраэдр SiO_4^{4-} . Силикаты кальция – это силикаты с крупными катионами, структурной единицей в них является диортогруппа $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$. В тоберморитовой сетке структурной единицей является инкремент $[\text{Si}_{12}\text{O}_{31}]^{14-}$. Избыток в Вольском ПЦ активной минеральной добавки на основе опоки будет способствовать образованию тоберморитового инкремента. Это значит, что гидросиликаты кальция – продукты конденсации кремнекислородных тетраэдров, происходящей по схеме:



По мере увеличения степени конденсации отношение $\text{O}:\text{Si}$ изменяется от 4,0 у $[\text{SiO}_4]^{4-}$ до 2,4 у тоберморита, что приводит к понижению основности структуры, так как из структуры удаляются носители крайних основных свойств – ионы кислорода. Эффективный заряд на атомах кремния повышается, сила кислотных центров на атомах кремния у ГСК больше, чем у поликремниевой кислоты. Поэтому по химической природе ГСК химически более активны, чем исходные компоненты, из которых они образуются, и адсорбционная активность их больше. Большое значение при этом имеют степень закристаллизованности, гранулометрическая неоднородность структуры гидросиликатов кальция.

В основу более строгих оценок влияния вида портландцементов на характер изменения параметров конструкционной прочности сравниваемых составов должно быть положено сравнение составов при одинаковом расходе цемента и численно равных значениях других факторов влияния.

Список литературы

1. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – 2-е издание, перераб и дополн. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
2. Мчедлов-Петросян, О.П. Поздние стадии гидратации цемента / О.П. Мчедлов-Петросян, В.Л. Чернявский, А.Г. Ольгинский // Цемент. – 1982. – №9. – С. 15–17.
3. Миронов, С.А. О структуре и прочности бетона, подвергнутого пропариванию / С.А. Миронов, Л.А. Малинина, О.Е. Королева, В.А. Федоров // В кн. «Структура, прочность и деформации бетонов». – М.: Стройиздат, 1966. – С. 217–226.
4. Миронов, С.А. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С.А. Миронов, И.М. Френкель, Л.А. Малинина [и др.]. – М.: Стройиздат, 1973. – 95 с.
5. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 25–27.
6. Сычев, М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня / М.М. Сычев // Журнал прикладной химии АН СССР. – 1981. – Т. LIV, № 9. – С. 2036–2043.
7. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
8. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
9. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2004. – 564 с.

10. Бабков, В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
11. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. – №5. – С. 8–10; №6. – С. 8–11; 2008. – №1. – С. 22–26.
12. Каприелов, С.С. Влияние состава органоминеральных модификаторов серии «МБ» на их эффективность / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 2001. – №5. – С. 11–15.
13. Макридин, Н.И. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных композитов / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, А.П. Прошин, Ю.А. Соколова, В.И. Соломатов; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2001. – 280 с.
14. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
15. Максимова, И.Н. Прочность и параметры разрушения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2015. – 360 с.
16. Максимова, И.Н. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: АСВ, 2017. – 400 с.
17. Макридин, Н.И. Сравнительный анализ механического поведения горных пород на диаграмме нагружения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.А. Тамбовцева // Строительные материалы. – 2014. – №10. – С. 34–39.
18. Макридин, Н.И. Фазовый состав и механические свойства модифицированной гидратационной структуры цементного камня многолетнего твердения / Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова И.А. Суров // Приволжский научный журнал. – 2014. – №4 (32). – С. 127–132.
19. Макридин, Н.И. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Известия вузов. Строительство. – 2015. – №3. – С. 14–22.
20. Максимова, И.Н. О параметрах механического поведения горных пород с позиций структурной механики разрушения материалов / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Н.А. Егина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2 (31). – С. 25–31.
21. Максимова, И.Н. Структурные изменения песчаных бетонов при кратковременном осевом сжатии / И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С. 29–38.
22. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – № 1–2. – С. 62–67.
23. Тараканов, О.В. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения / О.В. Тараканов, В.И. Калашников // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (39). – С. 223–229.

References

1. Mchedlov-Petrosyan, O.P. Chemistry of inorganic building materials / O.P. Mchedlov-Petrosyan. – 2nd edition, revised and supplemented. – М.: Stroyizdat, 1988. – 304 p.
2. Mchedlov-Petrosyan, O.P. The late stages of hydration of cement / O.P. Mchedlov-Petrosyan, V.L. Chernyavsky, A.G. Olginsky // Cement. – 1982. – № 9. – P. 15–17.
3. Mironov, S.A. On the structure and strength of steamed concrete / S.A. Mironov, L.A. Malinina, O.E. Koroleva, V.A. Fedorov // In the book «Structure, strength and deformation of concrete». – М.: Stroyizdat, 1966. – P. 217–226.

4. Mironov, S.A. Growth of concrete strength during steaming and subsequent hardening / S.A. Mironov, I.M. Frenkel, L.A. Malinina [et al.]. – M.: Stroiizdat, 1973. – 95 p.
5. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Geniev // Concrete and Reinforced Concrete. – 1995. – №4. – P. 25–27.
6. Sychev, M.M. Some questions of chemistry of concrete and cement stone / M.M. Sychev // Journal of Applied Chemistry of the USSR Academy of Sciences. – 1981. – Vol. LIV, No. 9. – P. 2036–2043.
7. Batrakov, V.G. Modified concrete. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2-nd ed. – M.: Stroiizdat, 1998. – 768 p.
8. Bazhenov, Yu.M. Modified high-quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – M.: ACU, 2006. – 368 p.
9. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2004. – 564 p.
10. Babkov, V.V. Structurization and destruction of cement concretes / V.V. Babkov, V.N. Mokhov, S.M. Kapitonov, P.G. Komokhov. – Ufa: State Unitary Enterprise «Ufa polygraphcombinat», 2002. – 376 p.
11. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology in the future of concrete / V.I. Kalashnikov // Technology of concrete. – 2007. – №5. – P. 8–10; №6. – P. 8–11; 2008. – №1. – P. 22–26.
12. Kaprielov, S.S. Influence of the composition of organomineral modifiers of the MB series on their effectiveness / S.S. Kaprielov, A.V. Sheynfeld // Concrete and reinforced concrete. – 2001. – №5. – P. 11–15.
13. Makridin, N.I. Structure, Deformability, Strength and Criteria of Destruction of Cement Composites / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, A.P. Proshin, Yu.A. Sokolova, V.I. Solomatov; Ed. by V.I. Solomatov. – Saratov: Saratov University Publishing House, 2001. – 280 p.
14. Makridin, N.I. Structural formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.
15. Maksimova, I.N. Strength and parameters of destruction of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – Saransk: Publishing house of the Mordovian University, 2015. – 360 p.
16. Maksimova, I.N. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: Publisher ASV, 2017. – 400 p.
17. Makridin, N.I. Comparative analysis of the mechanical behavior of rocks on the loading diagram / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.A. Tambovtseva // Building materials. – 2014. – №10. – P. 34–39.
18. Makridin, N.I. Phase composition and mechanical properties of the modified hydration structure of the cement stone for many years of hardening / N.I. Makridin, O.V. Tarakanov, I.N. Maksimova I.A. Surov // Privolzhsky scientific journal. – 2014. – №4 (32). – P. 127–132.
19. Makridin, N.I. Complex assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, Yu.V. Polubarova // Izvestiya of high schools. Building. – 2015. – №3. – P. 14–22.
20. Maksimova, I.N. On the parameters of the mechanical behavior of rocks from the standpoint of structural mechanics of material destruction / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, N.A. Egin // Regional architecture and engineering. – 2017. – №2 (31). – P. 25–31.
21. Maksimova, I.N. Structural changes of sandy concrete under short-term axial compression / I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P. 29–38.
22. Kalashnikov, V.I. On the use of complex additives in new generation concrete / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov // Building materials. – 2017. – No. 1–2. – P. 62–67.
23. Tarakanov, O.V. Prospects for the use of complex additives in new generation concrete / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2017. – № 1 (39). – P. 223–229.

УДК 691.4

DOI 10.54734/20722958_2023_3_61

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru

Светалкина Мария Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Quality
Management and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

Svetalkina Maria Anatolievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Quality Management and
Technology of Construction Production»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Ariskin Maksim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ЛАКОКРАСОЧНОМ ПОКРЫТИИ

В.И. Логанина, М.А. Светалкина, М.В. Арискин

Приведены результаты оценки напряженного состояния лакокрасочного покрытия в процессе растрескивания при эксплуатации (объект исследования – полимеризованное покрытие). В программном модуле SCAD Office выполнено численное моделирование образования трещины и распределения остаточных напряжений. Установлено, что в процессе движения трещины в марте происходит переход приповерхностной зоны трещины с растяжения на сжатие.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, трещины, напряжения

STUDY OF CRACK PROPAGATION IN PAINT COATING

V.I. Loganina, M.A. Svetalkina, M.V. Ariskin

The article is devoted to the assessment of paintwork stress state in the process of cracking during operation. The object of research is a polymer-lime coating. Numerical modeling of crack formation and distribution of residual stresses was performed in the SCAD Office software module. It has been established that in the process of crack movement in March, the near-surface zone of the crack changes from tension to compression.

Keywords: paintwork, cracks, stresses

Введение

Распространенным видом отделки фасадов зданий являются декоративные штукатурные смеси, лакокрасочные материалы [1–3]. В процессе эксплуатации на поверхности отделочных слоев появляются различного вида дефекты – растрескивание, отслаивание и т.д. Растрескивание покрытий происходит, когда внутренние растягивающие напряжения σ достигнут значения когезионной прочности R_{kog} материала покрытия, т.е.

$$\sigma > R_{kog} \quad (1)$$

Трещины в покрытии могут иметь технологическое происхождение или зарождаться и расти в процессе эксплуатации. Для оценки возникновения и распространения

трещины применяют различные методы исследования и расчета. Косвенные методы оценивают трещиностойкость по коэффициентам, учитывающим сочетание физико-механических свойств, или сами свойства: модуль упругости, предел прочности на растяжение, предельную растяжимость, деформацию усадки и другие свойства. Такой подход предложен Л.П. Орентлихер, И.П. Новиковой [4].

Шнейдеровой В.В. [5] предложена методика оценки трещиностойкости защитно-декоративных покрытий, которая заключается в определении ширины раскрытия трещины положки в момент разрушения покрытия. В [6–9] для оценки трещинообразования полимерных покрытий предложена методика, основанная на соотношении между длиной трещины, отпечатком индентора Виккерса и вязкостью разрушения. Данный метод в сочетании с методом акустической эмиссии АЭ позволяет обнаруживать зарождение, развитие и рост различных дефектов, характер и кинетику разрушения покрытий.

В работе [10] описан процесс изучения распространения трещин методом компьютерной графики. Гоброн С., Тоба Н. моделировали структуру трещин на 3D-объекте. Авторы представили исходную модель спектра напряжений, сопровождаемую описанием взаимодействия между трещинами и напряжениями.

Авторы работ [11, 12] для оценки напряженного состояния и возможности образования трещины в лакокрасочном покрытии применяли метод голографии.

Авторы [13–16] для определения перемещений и наличия трещин использовали метод цифровой обработки образов (PIV). Измерение поля перемещений в заданной плоскости основано на измерении перемещения отдельных частиц, для чего поверхность имела некоторую текстуру. Расчет полей сдвиговых, объемных деформаций проводится в программе MatLab.

Представляет научный и практический интерес исследование процесса возникновения и распространения трещины в лакокрасочном покрытии методом моделирования с целью разработки рекомендаций по повышению трещиностойкости покрытий.

Материалы и методы исследования

В качестве подложек рассматривался тяжелый бетон, характеризующийся значением коэффициента линейного температурного расширения КЛТР, равным $10,0 \cdot 10^{-6}$ 1/град. В качестве красочного состава применяли полимеризованную (ПИ) краску, значение коэффициента линейного температурного расширения КЛТР покрытия составляло $8,43 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Толщина покрытия составляла 1 мм.

Расчеты проводились для условий г. Москвы. Расчет был выполнен с помощью программного модуля SCAD Office. Расчетная модель представляет из себя конечные элементы оболочки с размером $0,1 \times 0,1$ мм. Для предотвращения влияния заделки на напряженно-деформированное состояние (далее НДС) в лакокрасочном слое и в области контакта с подложкой граничные условия задаются только на подложке таким образом, чтобы они располагались на расстоянии не менее чем 5 толщин лакокрасочного состава. Моделирование рельефа в подложке выполнялось путем введения дополнительных элементов треугольной формы. Моделировалась равномерно распределенная шероховатость поверхности подложки, при этом высота пиков и впадин составляла 0,1 мм. Исследования проводились по нескольким схемам (рис. 1). Точкой на схеме обозначено расположение трещины по сечению покрытий.

Предел прочности при растяжении определяли на разрывной машине ИР 5057-50 согласно ГОСТ 18299-72 «Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости». Метод основан на растяжении испытуемого образца свободной пленки с определенной скоростью до разрыва. Образцы для испытаний вырезали из свободной лакокрасочной пленки. Расчет производили по результатам испытания не менее 5 параллельных образцов. Предел прочности при растяжении R_{kog} в МПа (Н/мм^2) вычисляли по формуле

$$R_{kog} = \frac{F}{S}, \quad (2)$$

где F – растягивающая нагрузка в момент разрыва, Н; S – начальная площадь поперечного сечения образца, мм^2 .

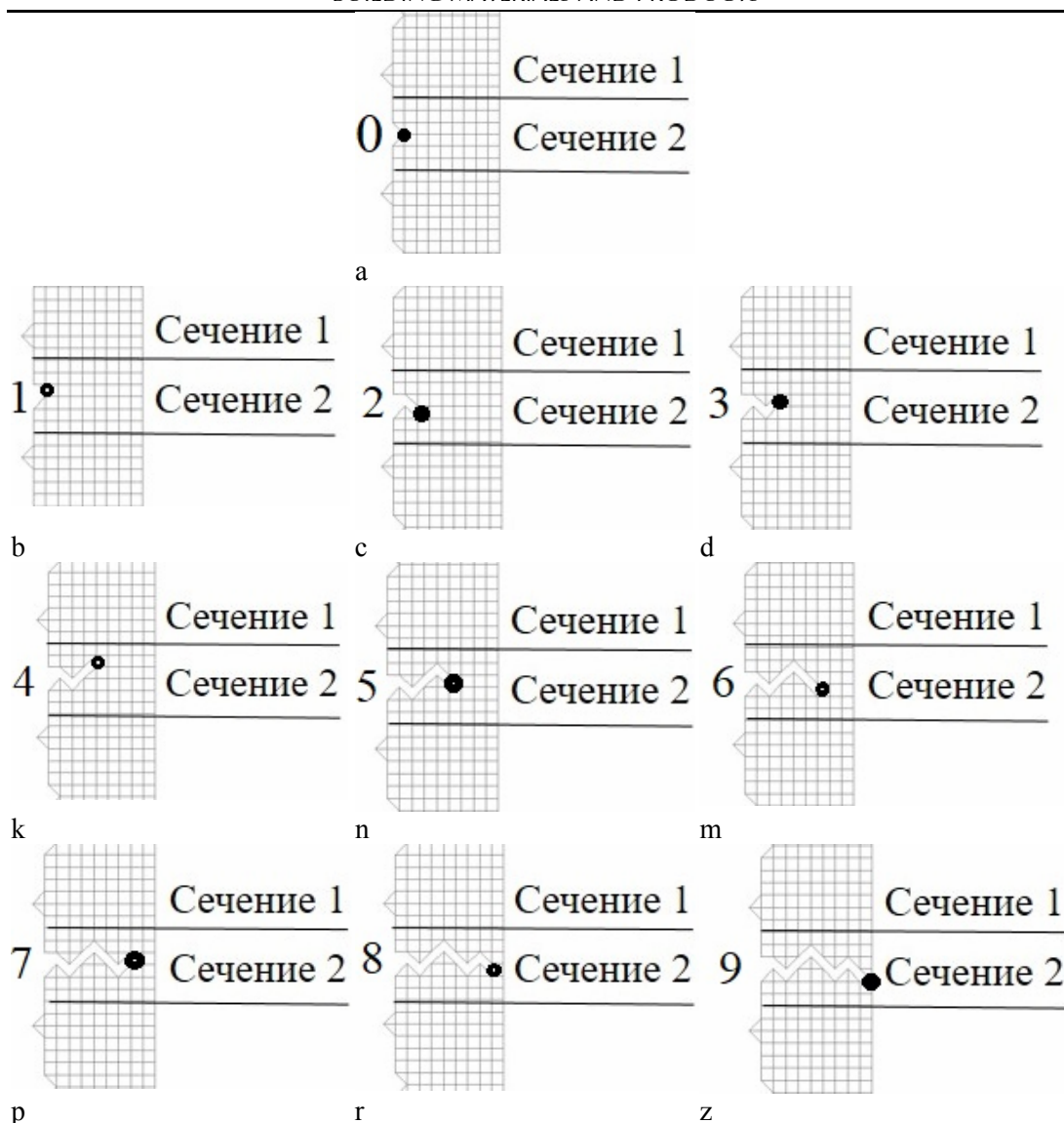


Рис. 1. Схема исследований:

а – без трещин; б – начало зарождения трещины (точка 1); с – продвижение трещины по сечению (точка 2); д – продвижение трещины по сечению (точка 3); к – продвижение трещины по сечению (точка 4); н – продвижение трещины по сечению (точка 5); м – продвижение трещины по сечению (точка 6); р – продвижение трещины по сечению (точка 7); г – продвижение трещины по сечению (точка 8); з – продвижение трещины по сечению (точка 9)

Результаты исследования

Анализ результатов исследований свидетельствует, что в процессе старения (действие увлажнения) полимеризвестковых покрытий наблюдается уменьшение когезионной прочности покрытий. Так, до испытания когезионная прочность полимеризвестковых покрытий составляла $R_{kog} = 0,13 \text{ МПа}$, а после 72 часов увлажнения – $0,09 \text{ МПа}$. При действии УФ-облучения в течение 150 часов когезионная прочность составляла $R_{kog} = 0,11 \text{ МПа}$.

Совместное воздействие эксплуатационных факторов (увлажнение-высушивание, замораживание-оттаивание, УФ-облучение) будет способствовать более быстрому снижению когезионной прочности покрытий. Учитывая, что длительная когезионная прочность покрытий составляет половину от кратковременной прочности, вероятность растрескивания покрытий очень высокая.

Рассмотрим процесс образования и распространения трещины в покрытии при воздействии температуры. Результаты расчета внутренних напряжений приведены на рис. 2, 3 и в таблице. Анализ данных свидетельствует, что максимальные значения

нормальных напряжений возникают в зоне микровпадины рельефа поверхности покрытия и составляют (в марте) $\sigma_x = 5,4 \text{ кН/м}^2$. Значение когезионной прочности полимеризвесткового покрытия составляет $R_{kog} = 0,13 \text{ МПа}$. Учитывая, что длительная когезионная прочность составляет 0,5 от кратковременной прочности $R_R = 0,5R$, в зоне микровпадины (точка 0) возможно образование трещины. В таблице приведены значения нормальных напряжений в полимеризвестковом покрытии в марте и октябре.

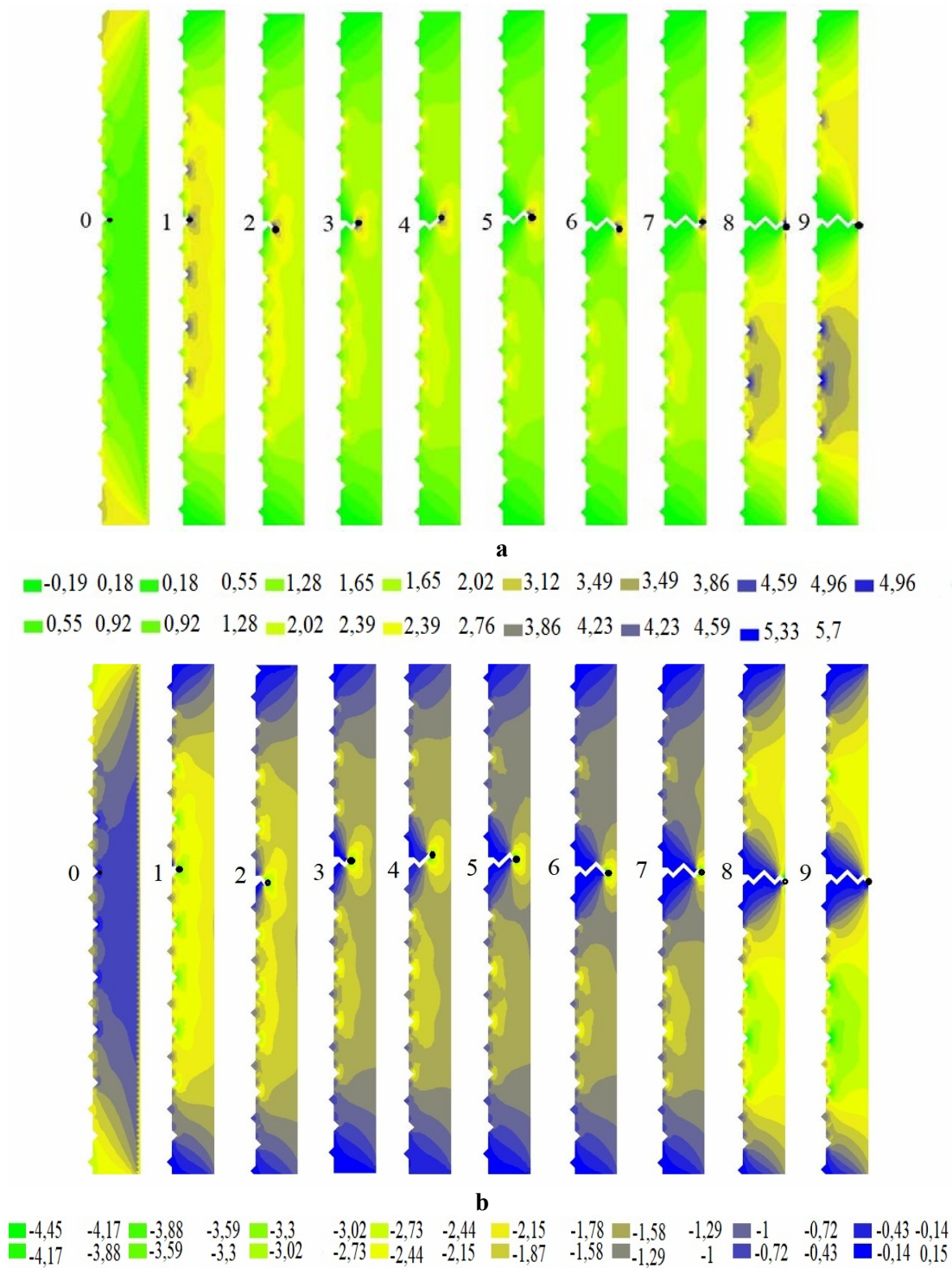


Рис. 2. Изополя напряжений, кН/м²:
а – в марте; б – в октябре

Значения нормальных напряжений в точках, кН/м^2

№ точки	Март, кН/м^2	Октябрь, кН/м^2
0	5,4	-3,25
1	7,32	-5,74
2	8	-6,25
3	8,9	-7,34
4	9,24	-7,36
5	9,38	-7,39
6	9,27	-7,1
7	8,65	-6,68
8	5,48	-4,49
9	48,9	-35,76

На рис. 3 приведены эпюры нормальных напряжений по сечению I и II по схеме b и z. Установлено, что значения нормальных напряжений в сечениях I и II (схема b) меньше по сравнению с значением напряжений в точке 1, т.е. в процессе движения трещины происходит как бы переход приповерхностной зоны трещины с растяжения на сжатие. Об этом свидетельствуют значения нормальных напряжений в точке 1, составляющие $\sigma=7,32 \text{ кН/м}^2$ (см. таблицу), и в сечениях I и II, составляющие соответственно $\sigma=1,63 \text{ кН/м}^2$ и $\sigma=3,11 \text{ кН/м}^2$ (см. рис. 3, a, b).

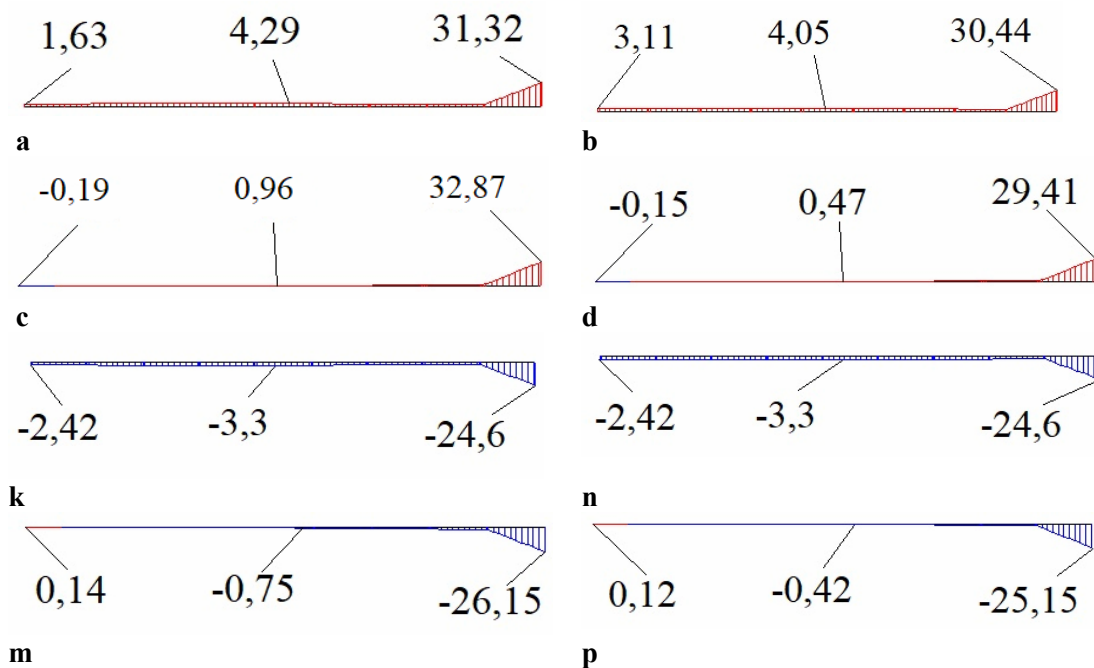


Рис. 3. Эпюры напряжений, кН/м^2 :

a – сечение I, март, точка 1; b – сечение II, март, точка 1; c – сечение I, март, точка 9;
d – сечение II, март, точка 9; k – сечение I, октябрь, точка 1; n – сечение II, октябрь, точка 1;
m – сечение I, октябрь, точка 9; p – сечение II, октябрь, точка 9

Наиболее ярко этот эффект наблюдается для значений напряжений в точке 9 (см. рис. 3, c, d). Происходит смена знака напряжений. На поверхности покрытий при наличии распространения трещины до точки 9 напряжения составляют $\sigma = -0,19 \text{ кН/м}^2$ и $\sigma = -0,15 \text{ кН/м}^2$.

В октябре значения нормальных напряжений в приповерхностной от трещины зоне (точка 1) составляют в сечении I и II $\sigma = -2,42 \text{ кН/м}^2$ (рис. 3, k, n), а в точке 1 $\sigma = -5,74 \text{ кН/м}^2$ (см. таблицу). Для точки 9 числовые значения нормальных напря-

жений на поверхности покрытия в октябре становятся положительными, составляющими $\sigma = 0,14 \text{ кН/м}^2$ и $\sigma = 0,12 \text{ кН/м}^2$.

Анализ распределения напряжений в покрытии свидетельствует о важности подготовки поверхности цементной подложки перед окраской с применением статистических методов контроля и управления качеством [17–19], с тем чтобы исключить концентрацию напряжений и вероятность образования трещины.

Таким образом, результаты проведенных исследований процесса трещинообразования позволят разработать рекомендации по повышению трещиностойкости лакокрасочных покрытий цементных бетонов.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.
2. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 8–12.
3. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
4. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков, Л.П. Орендлихер, В.И. Савин, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, И.П. Новикова. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.
5. Шнейдерова, В.В. Антикоррозийные лакокрасочные покрытия / В.В. Шнейдерова. – М.: Стройиздат, 1982. – 132 с.
6. Логанина, В.И. Оценка трещинообразования покрытий с помощью метода акустической эмиссии / В.И. Логанина, Н.И. Макридин, Л.В. Макарова, В.Н. Карпов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 6 (534). – С. 35–38.
7. Эванс, А.Г. Конструкционная керамика / А.Г. Эванс, Т.Г. Лэндон. – М.: Металлургия, 1980. – 255 с.
8. Макарова, Л.В. Методы оценки трещиностойкости защитно-декоративных покрытий / Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, В.А. Калинина // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 4. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51737> (дата обращения: 13.04.2015).
9. Макарова, Л.В. К вопросу трещиностойкости защитно-декоративных покрытий / Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, В.А. Калинина // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 4. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51794> (дата обращения: 16.04.2015).
10. Gobron, S. Crack pattern simulation based on 3D surface cellular automata / S. Gobron, N. Chiba // Visual Computer. – 2001. – 17 (5). – P. 287–309.
11. Логанина, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида / В.И. Логанина, И.В. Волков, В.В. Голубев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 7 (595). – С. 26–30.
12. Волков, И.В. Применение голографии для оценки напряженно-деформированного состояния лакокрасочных покрытий цементных бетонов / И.В. Волков, Л.П. Орендлихер, В.И. Логанина, В.В. Голубев, В.А. Монахов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2007. – № 9. – С. 43–45.
13. Boldyrev, G. Comparison of soil test data, obtained with different probes / G. Boldyrev, I. Guskov, S. Lavrov, V. Sidorchuk, D. Skopintsev // Proceedings 8. of the 3-d International Conference on the Flat Dilatometer. – 2015. – Vol. 3.

14. Boldyrev, G.G. Particle image velocimetry and numeric analysis of sand deformations under a test plate / G.G. Boldyrev, A.V. Melnikov, V.A. Barvashov // *Proceedings of the 5-th European Geosynthetics Congress*. – 2012. – Vol.1. – P. 685–691.
15. Болдырева, О.В. Определение перемещений железобетонной балки методом цифровой обработки образов / О.В. Болдырева // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2019. – №1. – С.23–28.
16. Мельников, А.В. Исследование деформированного состояния песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов / А.В. Мельников, Г.А. Новичков, Г.Г. Болдырев // *Международный журнал «Геотехника»*. – 2012. – No1. – С. 28–41.
17. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
18. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: АСВ, 2008.
19. Логанина, В.И. Статистические методы контроля и управления качеством продукции / В.И. Логанина, А.А. Федосеев. – Ростов-на-Дону, 2007.

References

1. Loganina, V.I. Rheological properties of a composite lime binder using synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2013. – No. 4 (652). – P. 37–42.
2. Loganina, V.I. Development of an organomineral additive for dry building mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // *Bulletin of the Belgorod State Technological University*. V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 8–12.
3. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
4. Gorchakov, G.I. Composition, structure and properties of cement concretes / G.I. Gorchakov, L.P. Orentlicher, V.I. Savin, V.V. Voronin, L.A. Alimov, I.P. Novikova. – M.: Stroyizdat, 1976. – 144 p.
5. Shneiderova, V.V. Anti-corrosion coatings / V.V. Shneiderova. – M.: Stroyizdat, 1982. – 132 p.
6. Loganina, V.I. Evaluation of crack formation in coatings using the acoustic emission method / V.I. Loganina, N.I. Makridin, L.V. Makarova, V.N. Karpov // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2003. – No. 6 (534). – P. 35–38.
7. Evans, A.G. Structural ceramics / A.G. Evans, T.G. Landon. – M.: Metallurgy, 1980. – 255 p.
8. Makarova, L.V. Methods for assessing the crack resistance of protective and decorative coatings / L.V. Makarova, R.V. Tarasov, V.A. Kalinina // *Modern scientific research and innovation*. – 2015. – No. 4. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51737> (date of access: 04/13/2015).
9. Makarova, L.V. On the issue of crack resistance of protective and decorative coatings / L.V. Makarova, R.V. Tarasov, V.A. Kalinina // *Modern scientific research and innovation*. – 2015. – No. 4. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51794> (date of access: 04/16/2015).
10. Gobron, S. Crack pattern simulation based on 3D surface cellular automata / S. Gobron, N. Chiba // *Visual Computer*. – 2001. – 17 (5). – P. 287–309.
11. Loganina, V.I. Evaluation of the stress-strain state of a paint coating depending on the quality of its appearance / V.I. Loganina, I.V. Volkov, V.V. Golubev // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2008. – No. 7 (595). – P. 26–30.
12. Volkov, I.V. The use of holography to assess the stress-strain state of paint and varnish coatings of cement concrete / I.V. Volkov, L.P. Orentlicher, V.I. Loganina, V.V. Golubev, V.A. Monakhov // *Coating materials and their application*. – 2007. – No. 9. – P. 43–45.

13. Boldyrev, G. Comparison of soil test data, obtained with different probes / G. Boldyrev, I. Guskov, S. Lavrov, V. Sidorchuk, D. Skopintsev // Proceedings 8. of the 3-d International Conference on the Flat Dilatometer. – 2015. – Vol. 3.
14. Boldyrev, G.G. Particle image velocimetry and numeric analysis of sand deformations under a test plate / G.G. Boldyrev, A.V. Melnikov, V.A. Barvashov // Proceedings of the 5-th European Geosynthetics Congress. – 2012. – Vol.1. – P. 685–691.
15. Boldyreva, O.V. Determination of displacements of a reinforced concrete beam by digital image processing / O.V. Boldyreva // Structural mechanics and calculation of structures. – 2019. – No. 1. – P.23–28.
16. Melnikov, A.V. The study of the deformed state of the sandy base using the method of digital image processing / A.V. Melnikov, G.A. Novichkov, G.G. Boldyrev // International journal «Geotechnics». – 2012. – No1. – P. 28–41.
17. Loganina, V.I. To the question of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
18. Loganina, V.I. Quality management at the enterprises of the construction industry / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: DIA, 2008.
19. Loganina, V.I. Statistical methods of control and management of product quality / V.I. Loganina, A.A. Fedoseev. – Rostov-on-Don, 2007.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2023_3_69

*Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46.

Шорстова Елена Степановна,
кандидат технических наук, ассистент
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
E-mail: kuzik_alena@mail.ru

Клюев Александр Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
E-mail: klyuyevav@yandex.ru

Клюев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Теоретическая
механика и сопротивление материалов»
E-mail: klyuyev@yandex.ru

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального
проекта “Наука и университеты” новой лаборатории “Ресурсо-энергосберегающие
технологии, оборудование и комплексы” (FZWN-2021-0014).

*Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Shorstova Elena Stepanovna,
Candidate of Sciences, Assistant of the
Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: kuzik_alena@mail.ru

Klyuev Aleksander Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: klyuyevav@yandex.ru

Klyuev Sergey Vasilyevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: klyuyev@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

ТОНКОМОЛОТЫЙ ОТСЕВ ДРОБЛЕНИЯ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА В ФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Е.С. Шорстова, А.В. Клюев, С.В. Клюев, И.А.Гарькина

Приведены результаты исследований, направленные на расширение спектра составов бетонов для 3D-печати, удовлетворяющих технологическим требованиям. Показано, что эффективность 3D-печати и качество печатных строительных объектов можно повысить регулированием дисперсности и гранулометрического состава активных минеральных добавок. Определена оптимальная активная добавка для получения фибробетона на основе использования 3D-печати.

Ключевые слова: фибробетон, минеральные добавки, модификаторы, пуццолановая активность, добавка-уплотнитель, удельная поверхность, 3D-печать

The work was prepared with financial support within the framework of the national project “Science and Universities” of the new laboratory “Resource-energy-saving technologies, equipment and complexes” (FZWN-2021-0014).

THIN-GROUNDED QUARTZITE SANDSTONE CRUSHING SCREENING IN FIBER CONCRETE MIXTURE FOR 3D-PRINTING

E.S. Shorstova, A.V. Klyuev, S.V. Klyuev, I.A. Garkina

Researches are presented aimed at expanding the range of concrete compositions for 3D-printing that meet technological requirements. It is shown that the efficiency of 3D-printing and the quality of

printed building objects can be improved by adjusting the dispersion and particle size distribution of active mineral additives. The optimal active additive for the production of fiber-reinforced concrete based on the use of 3D-printing is determined.

Keywords: fibroconcrete, mineral additives, modifiers, pozzolan activity, sealer additive, specific surface area, 3D-printing

Постановка задачи. В настоящее время значительное внимание уделяется аналитическим методам конструирования сложных систем с учетом их многомодельности [1]. Это относится и к приготовлению бетонной смеси с использованием различных минеральных добавок, в частности микрокремнезема. Большой практический и научных интерес проявляется к использованию и других технических кремнеземов, применение которых в бетонах раньше считалось нецелесообразным по экономическим соображениям [2...4].

При этом использование данного вида модификаторов в композите имеет двойной эффект. Из-за сферической формы частиц обеспечивается так называемый «подшипниковый» эффект, то есть смесь становится более подвижной, легче транспортируется и повышается ее удобоукладываемость [5]. С другой стороны, непосредственно кремнеземистый компонент проявляет высокую пуццолановую активность, вступая в химическую реакцию с гидроксидом кальция, образующимся в процессе гидратации клинкерных минералов. Также кремнезем и микрокремнезем используются в качестве добавки-уплотнителя смеси. Поэтому нами осуществлялся помол отсева кварцитопесчаника (КВП) от 30 мин и до момента остановки прироста удельной поверхности материала с целью использования в качестве добавки-аналога технического микрокремнезема в фибробетонной смеси [6...9].

Теоретические и натурные исследования. В результате теоретических исследований зависимости величины удельной поверхности от времени помола (табл. 1) установлено, что интенсивное увеличение удельной поверхности происходит в первые 30 мин, далее процесс постепенно затухает, и при времени помола от 150 до 180 мин величина удельной поверхности составляет всего 25 м²/кг в сравнении с 200 м²/кг в первые полчаса помола.

Т а б л и ц а 1

Кинетика помола отсева дробления кварцитопесчаника

Вид материала	Удельная поверхность, м ² /кг, при времени помола, мин					
	30	60	90	120	150	180
Отсев дробления кварцитопесчаника	545	748	870	935	1075	1100

По гранулометрическому составу средний размер частиц размолотого отсева КВП расположен в диапазоне от 3,04 до 6,1 мкм (50 % вещества) (рис. 1, 2). Причем средний размер частиц меняется в зависимости от времени помола 30–60–90–120–150–180 мин: 4,53–3,96–3,84–4,35–6,1–3,04 мкм соответственно. Увеличение среднего размера частиц говорит о вторичной агрегации мельчайших зерен при времени помола 120–150 мин, затем идет их разрушение более крупными частицами.

Характер кривых распределения частиц отсева КВП также меняется в зависимости от времени помола. Изначально (30 мин помола) это одномодальный график с небольшим пиком в области 0,05–0,3 мкм. Далее этот пик значительно снижается (60–120 мин), и можно снова его наблюдать при времени помола 150 мин. Характер кривой при времени помола 150 мин полимодальный с 4 пиками: 0,1–0,3 мкм, со значительным содержанием частиц 0,5–7 мкм и 7–50 мкм и последним пиком 50–100 мкм (рис. 1).

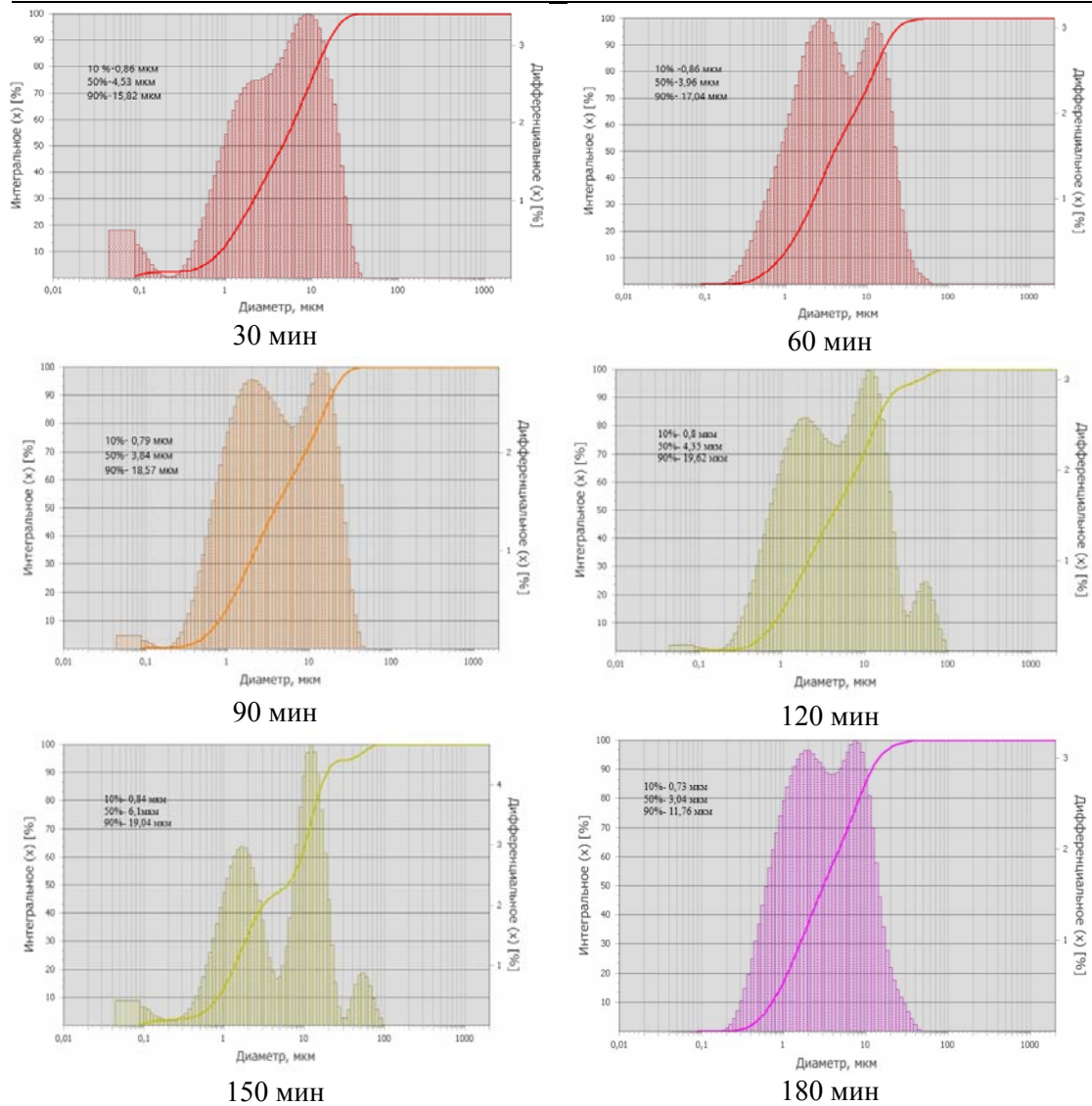


Рис. 1. Графики распределения частиц отсева КВП после помола по размерам

Такой характер распределения частиц наиболее оптимально подходит для получения бетона для 3D-печати, так как способен оказать положительное влияние на его качество за счет максимально плотной упаковки частиц всех фракций (рис. 2).

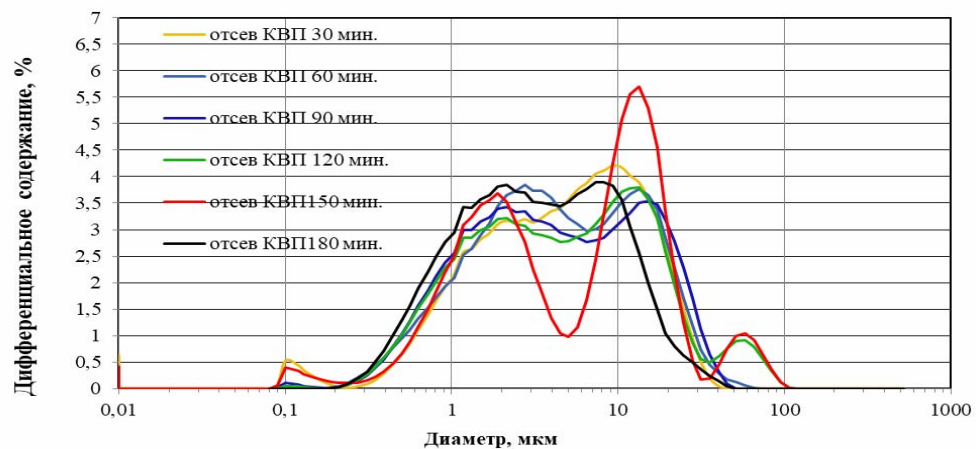


Рис. 2. Анализ распределения частиц кварцитопесчаника по размерам с учетом кинетики помола

Анализ полученных микрофотографий показал, что при помоле отсева в течение 30 минут в общей массе присутствуют наряду с мелкими частицами и крупные неразмолотые частички остроугольной формы (рис. 3, а), содержание которых заметно уменьшается с дальнейшим помолом, а форма становится окатанной (время – 90 мин включительно) (рис. 3, б, в). Это объясняется тем, что зерна породы, состоящие из нескольких минералов, легко разрушаются по контактной зоне, мономинеральные составляющие размалываются значительно дольше, являясь в последующем дополнительными мелющими телами.

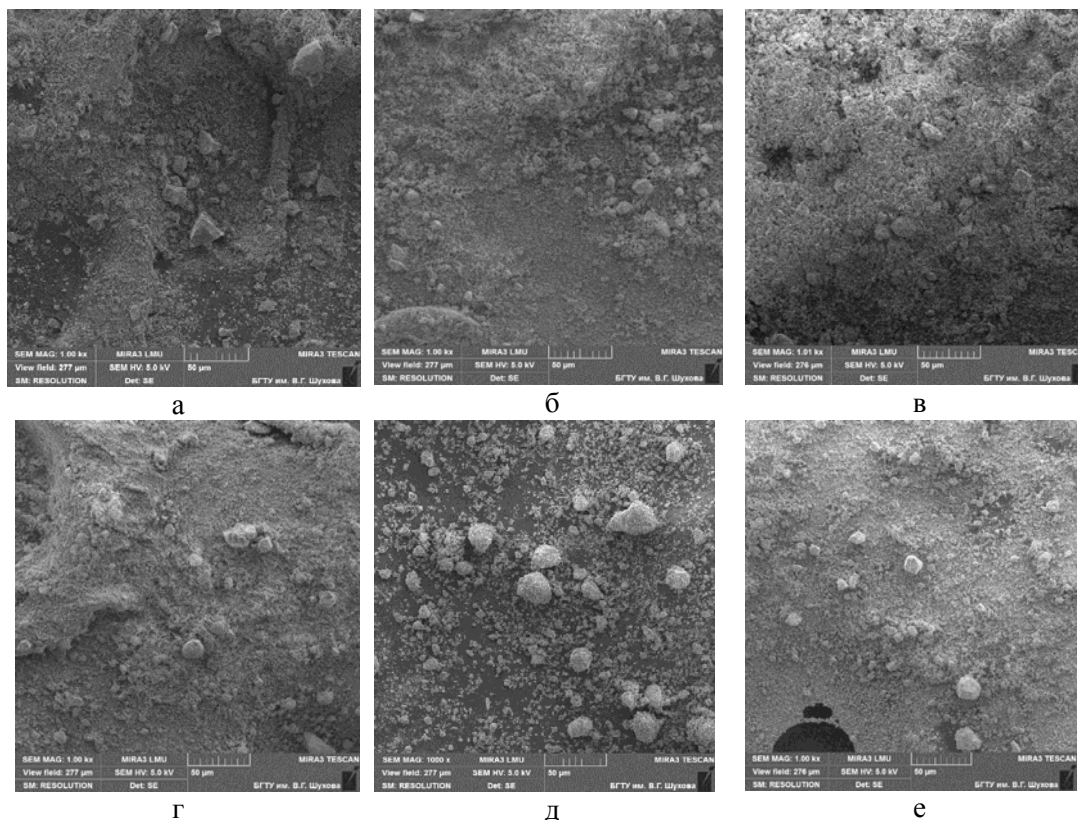


Рис. 3. Форма и размеры частиц отсева КВП, помолотых в течение:
а – 30 мин; б – 60 мин; в – 90 мин; г – 120 мин; д – 150 мин; е – 180 мин, x1000

В дальнейшем (при времени помола от 120 до 180 мин) наблюдается постепенное нарастание количества крупных частиц (рис. 3, г, е, д), поскольку мельчайшие перемолотые частицы начинают собираться в конгломераты и происходит вторичная агрегация. При этом в области более мелких частиц при помоле в течение 30–60 мин все также присутствуют более крупные неразмолотые частички по сравнению с общей массой вещества, количество которых сокращается при помоле в течение 90–120 мин (рис. 4). Далее (время помола 150–180 мин) можно наблюдать практически однородное по фракционному составу вещество в этом диапазоне частиц.

При анализе наночастиц полученных порошков (x50000) включения наиболее крупных фракций наблюдаются при помоле в течение 30 мин, далее размер частиц уменьшается (60 мин) и снова возрастает (90 мин) (рис. 5).

При помоле в течение 120–180 мин можно наблюдать как повсеместное присутствие мономинеральных частиц, так и значительное количество конгломератов, полученных при повторной агрегации, однако все частицы имеют уже окатанную форму, когда смесь становится более подвижной, повышается удобоукладываемость.

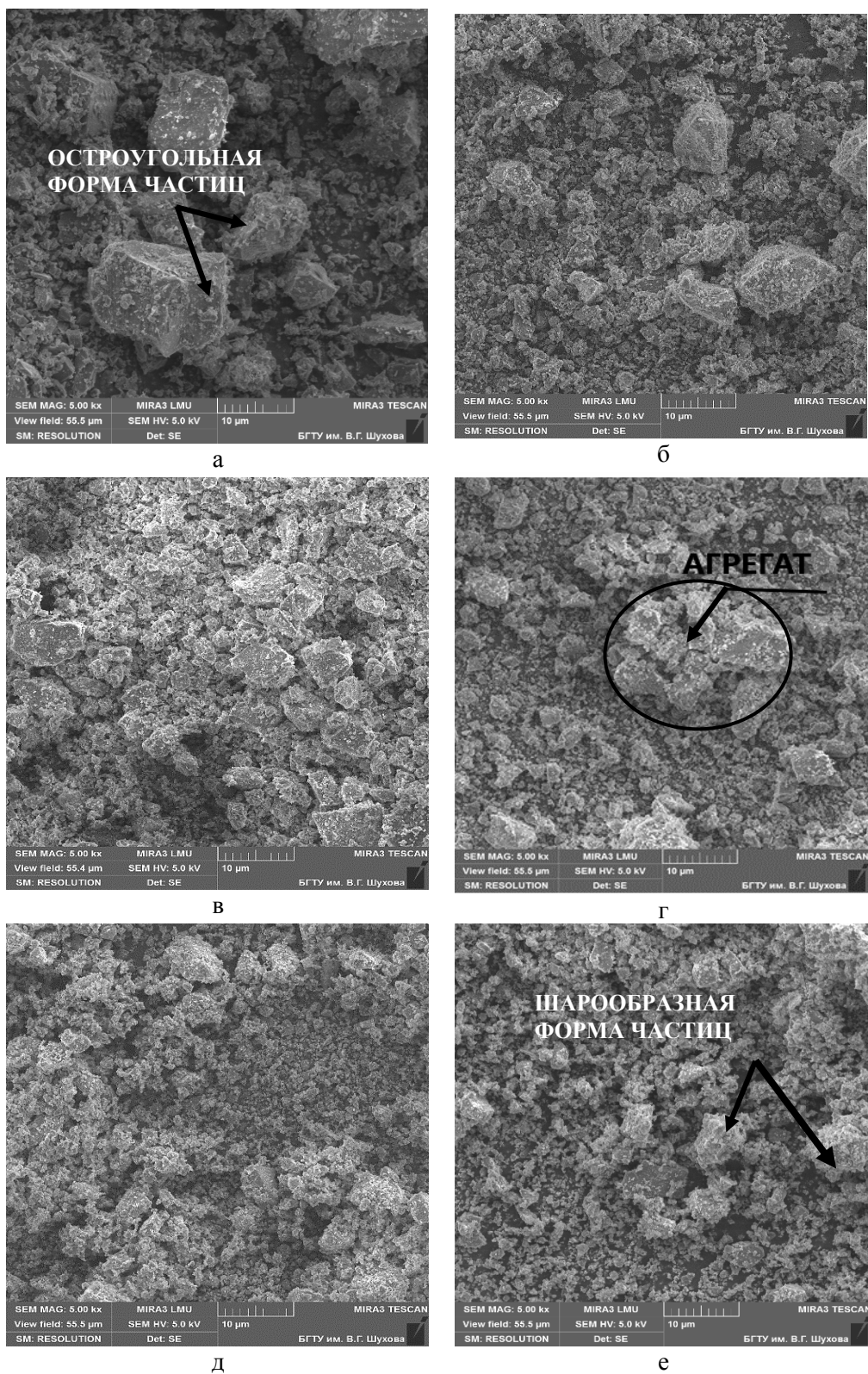


Рис. 4. Форма, размеры и характер поверхности частиц отсева КВП, помолотых в течение:
а – 30 мин; б – 60 мин; в – 90 мин; г – 120 мин; д – 150 мин; е – 180 мин, x5000

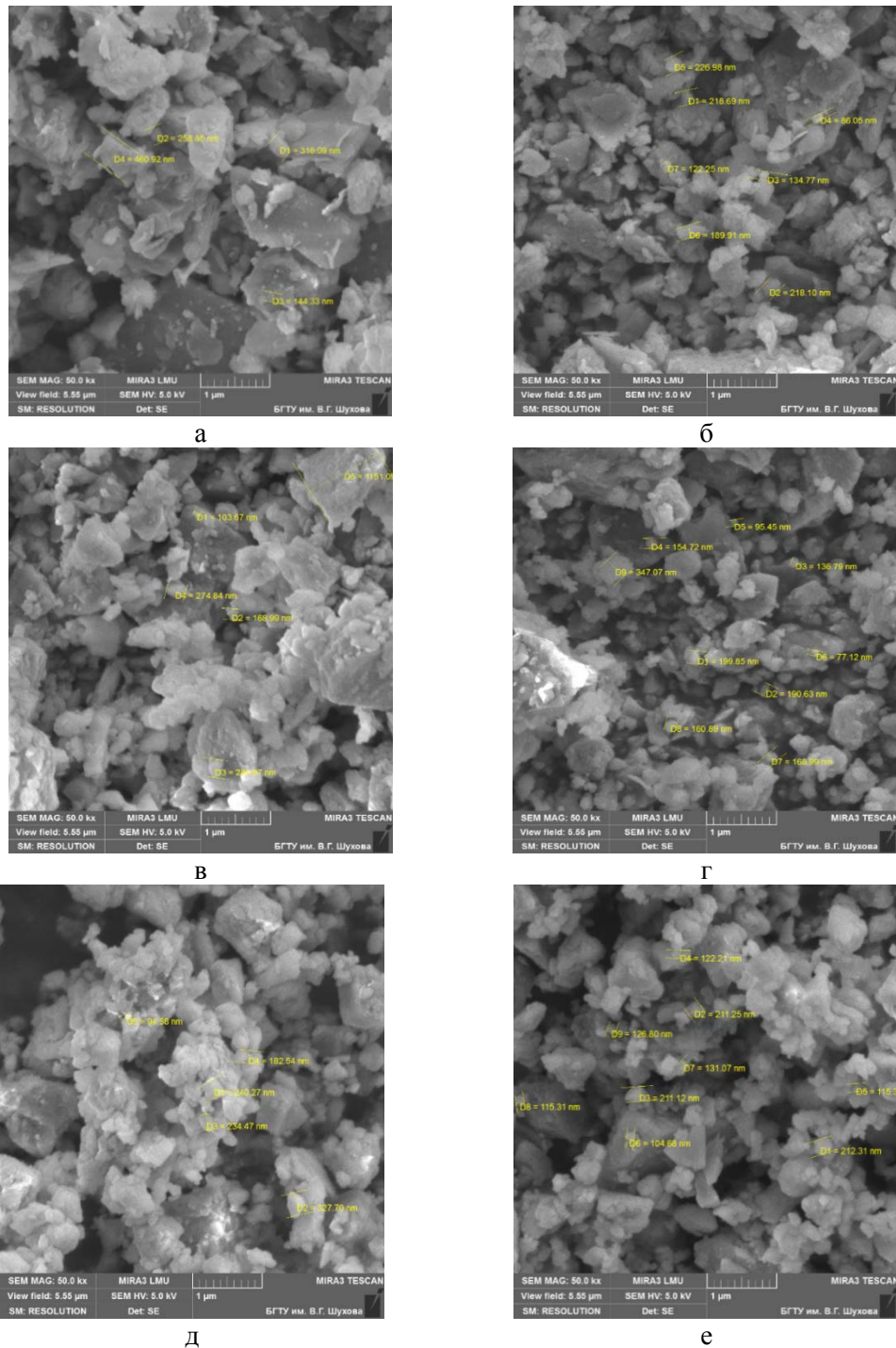


Рис. 5. Форма, размеры и характер поверхности наиболее мелких частиц отсева КВП, помолотых в течение:

а – 30 мин; б – 60 мин; в – 90 мин; г – 120 мин; д – 150 мин; е – 180 мин, x50000

В связи с высокой дисперсностью частиц при хранении размолотый отсев КВП будет подвергаться уплотнению и агрегации в условиях естественной влажности с закономерным увеличением среднего размера частиц, поэтому необходимо будет разрабатывать и рассматривать различные варианты активации порошкообразной добавки в дальнейшем.

Таким образом, характер распределения частиц размоленного отсева КВП $S_{уд}=1075 \text{ м}^2/\text{кг}$ (помол в течение 150 мин) позволяет рассматривать его как оптимальную активную добавку для получения фибробетона для 3D-печати; более широкий

диапазон фракций будет способствовать повышению пластической прочности, а окатанная форма обеспечит лучшую формуемость сырьевой смеси.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Аналитическое конструирование композитов: многомодельность, структура модели, декомпозиция, критерии качества / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – №2. – 2021. – С.22–28.
2. Махортов, Д.С. Вяжущие композиции на основе портландцемента и вулканического пепла / Д.С. Махортов, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 30–38.
3. Гуторов, М.В. Вяжущие для строительных 3D-технологий / М.В. Гуторов, Н.Ю. Чепенко, А.С. Токарев, А.В. Потапенко, Е.В. Городецкий, И.В. Магомедов, З.Г. Абсиметов // Сборник материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – С. 1519–1524.
4. Толыпин, Д.Ф. Эффективный способ переработки бетонного лома 3D-печати / Д.Ф. Толыпин, Н.М. Толыпина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 12–18.
5. Мухаметрахимов, Р.Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати / Р.Х. Мухаметрахимов // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 42–58.
6. Klyuev, S. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials / S. Klyuev, R. Fediuk, M. Ageeva, E. Fomina, A. Klyuev, E. Shorstova, S. Zolotareva, N. Shchekina, A. Shapovalova, L. Sabitov // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – e01099.
7. Klyuev, S.V. Technology of 3-D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 141. – P. 224–230.
8. Klyuev, S.V. Fiber concrete for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 367–372.
9. Klyuev, S.V. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – V. 974. – P. 131–135.

References

1. Garkina, I.A. Analytical design of composites: multi-modeling, model structure, decomposition, quality criteria / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. – №2. – 2021. – P.22–28.
2. Makhortov, D.S. Binder compositions based on Portland cement and volcanic ash / D.S. Makhortov, L.H. Zagorodnyuk, D.A. Sumskoy // Construction Materials and Products. – 2022. – №5 (4). – P. 30–38.
3. Gutorov, M.V. Binders for 3D construction technologies / M.V. Gutorov, N.Yu. Chepenko, A.S. Tokarev, A.V. Potapenko, E.V. Gorodetsky, I.V. Magomedov, Z.G. Absimetov // Collection of materials of the International Scientific and Technical Conference of Young scientists of V.G. Shukhov BSTU. – 2017. – P. 1519–1524.
4. Tolyпин, D.A. Effective method of processing 3D printing concrete scrap / D.A. Tolyпин, N.M. Tolyпина // Construction Materials and Products. – 2021. – №4 (2). – P. 12–18.
5. Mukhametrakhimov, R.Kh. Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D printing / R.Kh. Mukhametrakhimov // Construction Materials and Products. – 2022. – №5 (5). – P. 42–58.
10. Klyuev, S. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials / S. Klyuev, R. Fediuk, M. Ageeva, E. Fomina, A. Klyuev, E. Shorstova, S. Zolotareva,

N. Shchekina, A. Shapovalova, L. Sabitov // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – e01099.

11. Klyuev, S.V. Technology of 3-D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 141. – P. 224–230.

12. Klyuev, S.V. Fiber concrete for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 367–372.

13. Klyuev, S.V. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – V. 974. – P. 131–135.

УДК 691-4

DOI 10.54734/20722958_2023_3_77

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru

Жегера Кристина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: jegera@yandex.ru

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»
E-mail: lavrov0909@gmail.com

Живаев Александр Александрович,
кандидат технических наук,
инженер ООО «ГЕОТЕХ»
E-mail: zhivaevalex@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Quality
Management and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

Zhegera Kristina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Quality Management and
Technology of Construction Production»
E-mail: jegera@yandex.ru

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate Student of the department
«Technology of building materials and
woodworking»
E-mail: lavrov0909@gmail.com

Zhivaev Aleksander Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Engineer GEOTECH
LLC
E-mail: zhivaevalex@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина, К.В. Жегера, И.Ю. Лавров, А.А. Живаев

Приведены сведения о применении метода цифровой обработки образов для оценки трещинообразования лакокрасочных покрытий. Установлено, что появление микро-трещин можно обнаружить при нагрузке 0,01 кгс при значениях поперечных деформаций 0,01 мм. По мере распространения трещины изменяется изополе деформированного состояния пленки, увеличиваются деформации и доля деформации в устье трещины. Применение метода цифровой обработки образов позволит разработать рекомендации по повышению трещиностойкости лакокрасочных покрытий.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, деформации, трещинообразование, метод цифровой обработки образов

APPLICATION OF THE METHOD OF DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR EVALUATION OF CRACK FORMATION IN PAINT COATINGS

V.I. Loganina, K.V. Zhegera, I.Yu. Lavrov, A.A. Zhivaev

Information is given on the application of the method of digital processing of images to assess cracking in paint coatings. It has been established that the appearance of microcracks was detected at a load of 0.01 kgf with transverse strain values of 0.01 mm. As the crack propagates, the isofield of the deformed state of the film changes, the deformations and the fraction of deformation at the crack mouth increase. The application of the digital image processing method will make it possible to develop recommendations for improving the crack resistance of paint and varnish coatings.

Keywords: paintwork, deformation, cracking, digital image processing method

Введение

Одним из самых распространенных дефектов защитно-декоративных покрытий фасадов зданий является растрескивание [1–3]. В связи с этим исследование процессов трещинообразования и разработка рекомендаций по повышению трещиностойкости являются важной научно-технической задачей [4, 5]. В настоящее время разработано множество методов обнаружения трещин, основанных на использовании датчиков или детекторов. Для обнаружения развития трещин применяют оптоволоконные датчики [6–9], гибкие датчики деформации [10], пьезоэлектрические керамические датчики [11, 12] и датчики акустической эмиссии [13–15].

Для имитации образования трещин довольно часто применяется модель конечных элементов (FEM) [16].

Шнейдеровой В.В. [17] предложена методика оценки трещиностойкости защитно-декоративных покрытий, суть которой заключается в моделировании процесса образования трещин в железобетонном элементе, при растяжении которого в бетоне под покрытием создаются трещины. Состояние покрытия над трещиной замеряемой ширины оценивают по его сплошности при 20–30-кратном увеличении через оптический прибор. За показатель трещиностойкости принимают ширину раскрытия трещины, предшествующей той, когда было замечено образование первого дефекта в покрытии над трещиной.

В работе [18] предлагается для оценки трещинообразования полимерных покрытий использовать методику, основанную на соотношении между длиной трещины, отпечатком индентора Виккерса и вязкостью разрушения. В этом методе значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} определяется по длине радиальных трещин, образующихся в хрупких материалах из углов отпечатка индентора Виккерса. Авторами установлено, что при оценке трещиностойкости с использованием предлагаемой методики наблюдается небольшой разброс получаемых значений коэффициента интенсивности напряжений.

В последнее время широко развивается новое научное направление – механика разрушения. Применение концепций механики разрушения позволяет получать качественные и количественные характеристики трещиностойкости. Английский ученый Гриффитс сформулировал энергетический подход к количественной оценке трещиностойкости именно с позиций современной механики разрушения. Главная идея состояла в том, что потенциальная энергия тела, накопленная им в процессе упругого деформирования, в начале разрушения полностью затрачивается на образование новых поверхностей [19]. Широкое распространение в области механики разрушения покрытий получил метод акустической эмиссии [20]. Авторами получена комплексная оценка влияния качества подложки на трещиностойкость покрытий с использованием индентирования методом Виккерса и методом акустической эмиссии АЭ.

В [21–25] для определения перемещений и наличия трещин в образце предложено использовать метод цифровой обработки образов (PIV). PIV – международное название метода цифровой трассерной визуализации. Particle Image Velocimetry (PIV) относится к классу бесконтактных методов измерений. Путем обработки цифровых изображений могут быть получены поля перемещений частиц, деформации сдвига и объема и др. Хорошая сходимость результатов обработки и повышение точности полученных результатов достигается обработкой одной и той же области несколько раз, при этом используется результат предыдущей итерации в качестве оценки для параметров обработки на следующей итерации.

Область применения PIV-метода довольно обширна. Она включает в себя как фундаментальные, так и прикладные научные исследования. Среди них можно выделить задачи оптимизации обтекания летательных аппаратов и судов в авиастроении, кораблестроении, конструкций промышленных агрегатов в энергетике и нефтегазовой промышленности, изучение процессов в двигателях внутреннего сгорания, физическое моделирование работы искусственных сосудов и клапанов в медицине и др.

Представляет научный и практический интерес применение метода цифровой обработки образов при исследовании распространения трещины в лакокрасочном

покрытии, так как полученные закономерности позволят разработать рекомендации по повышению качества покрытий.

Материалы и методы исследования

В качестве красочного состава применяли вододисперсионную краску ВА-17 белого цвета. Пленку получали нанесением краски на неадгезированную подложку. После отверждения пленки из нее вырезались образцы размером $h=51,02$ мм, шириной $l=7,67$ мм. Измерение поля перемещений в заданной плоскости основано на измерении перемещения отдельных частиц, для чего поверхность должна иметь некоторую текстуру. Для создания текстуры на поверхность пленки наносилась дискретно краска из баллончика.

Образцы частиц регистрировались на цифровую камеру. Освещение выбиралось так, чтобы объект съемки был равномерно освещен, отсутствовали блики и тени. Видеофиксация выполнялась через определенные промежутки времени со скоростью 60 кадров/с. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещения частиц за некоторое время, построить двухкомпонентное поле перемещений. Для уменьшения геометрических искажений видеокамера была сфокусирована на плоскости поверхности покрытия. Фокусное расстояние объектива камеры и значение диафрагмы подбирались для обеспечения максимальной размещающей способности и минимизации оптических искажений. В исследовании применялся кросскорреляционный алгоритм, когда начальные и конечные положения частиц фиксируются на разные снимки. Каждое изображение разбивалось на элементарные области (расчетные области) размером X на X пикселей таким образом, чтобы в каждую расчетную область попало хотя бы несколько частиц.

Скорость растяжения образца при испытании составляла 10 мм/мин. Испытания проводились на разрывной установке ИР 5057-50. Образец плёнки закрепляли в зажимах разрывной машины так, чтобы его продольная ось была расположена в направлении растяжения, а приложенные силы действовали равномерно по всему сечению образца. Испытания проводили при температуре воздуха $t=(20\pm 2)$ °С и относительной влажности воздуха $\varphi=65$ %. Обработка данных, расчет полей сдвиговых, объемных деформаций и другие дополнительные операции, а также графическое оформление результатов проводились в программе MatLab.

Результаты исследований

На рис. 1 представлена диаграмма «нагрузка – деформация». Максимальная нагрузка при растяжении составила 0,46 кгс, относительные деформации – 0,234 мм/мм.

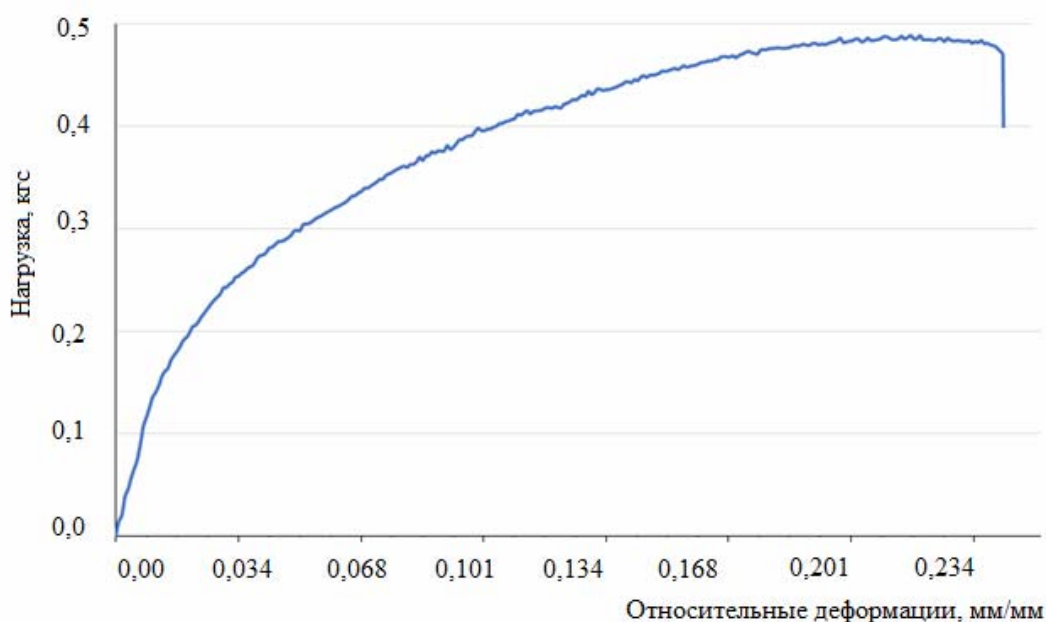


Рис. 1. Диаграмма «нагрузка – деформация»

На рис. 2, 3 показаны характерные особенности развития трещины от начала зарождения. На рис. 2 представлены сводные деформации по всей поверхности лакокрасочной пленки. Справа от каждого изображения деформированной поверхности покрытия приведена шкала значений деформаций в мм в соответствии с цветовой гаммой. На рис. 3 представлены поперечные деформации по всей поверхности лакокрасочной пленки в долях единиц. Справа от каждого изображения деформированной поверхности покрытия приведена шкала значений поперечных деформаций в долях в соответствии с цветовой гаммой.

Рассматривалось развитие поперечной трещины, являющейся причиной разрушения пленки.

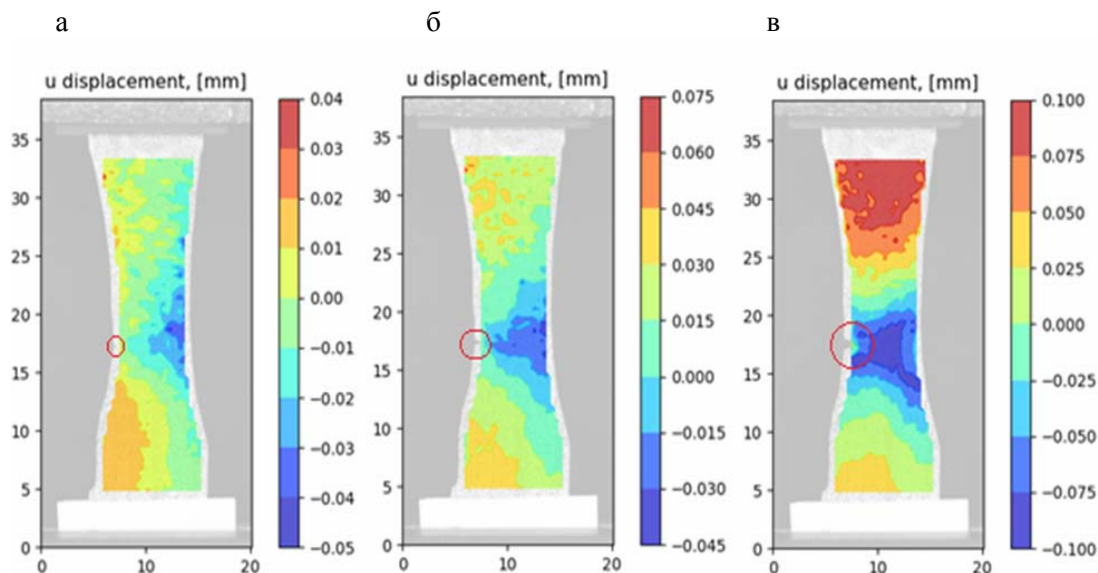


Рис. 2. Изображение деформированной поверхности пленки:
а – начало зарождения трещины; б, в – продвижение трещины

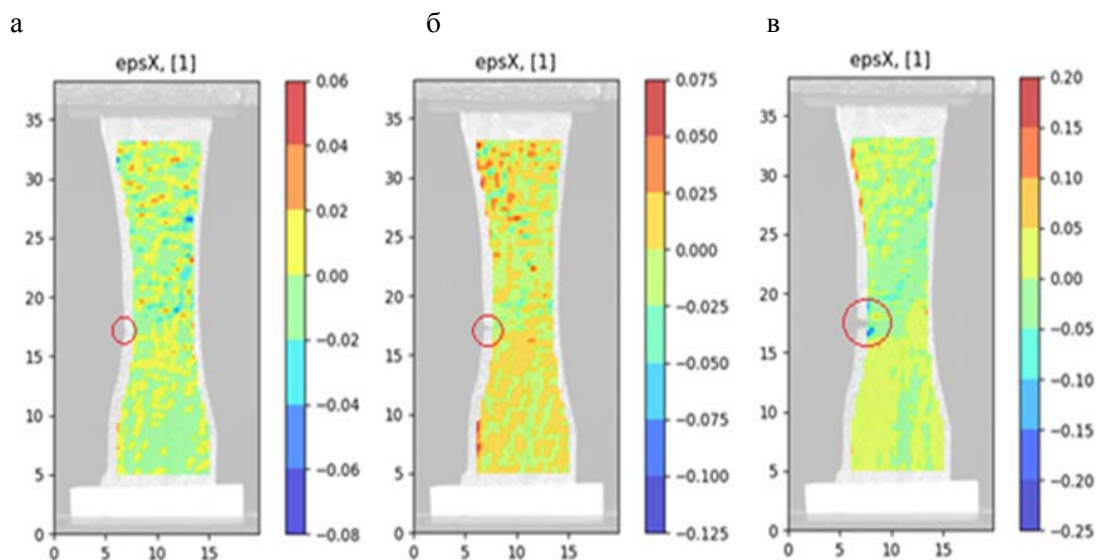


Рис. 3. Изображение деформированной поверхности пленки
(деформации по оси x в долях единицы)

На рис. 2, 3 зафиксировано начало трещинообразования и развитие трещины. Установлено, что полосы сдвига наблюдаются уже на первой ступени нагружения (рис. 2, а). Процесс образования трещины идет из середины пленки (из ее узкой части). Деформации в момент появления трещины составляли 0,01мм (рис. 2, а). Появление микротрещин было обнаружено при нагрузке 0,01 кгс.

По мере распространения трещины изменяется изополе деформированного состояния пленки. Деформации в устье трещины увеличиваются и становятся равными 0,025 мм (рис. 2, в).

Также увеличивается доля поперечной деформации. Если на стадии зарождения трещины доля поперечной деформации составляла 0,02 (рис. 3, а), то по мере развития трещины доля поперечной деформации увеличивается и становится равной 0,1 (рис. 3, в).

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность применения метода цифровой обработки образов для исследования трещинообразования лакокрасочных пленок. Результаты исследований помогут в разработке рекомендаций по повышению трещиностойкости лакокрасочных покрытий.

Список литературы

1. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // *Case Studies in Construction Materials*. – 2018. – Vol. 8. – P. 213–216.
2. Логанина, В.И. Оценка степени разрушения защитно-декоративных покрытий / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, В.Г. Христолюбов // *Лакокрасочные материалы*. – 2004. – №9. – С.14–18.
3. Loganina, V.I. Maintenance of quality of paint and varnish coverings of building products and designs. *Contemporary Engineering Sciences*. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1943–1947.
4. Логанина, В.И. К методике оценки трещиностойкости защитно-декоративных покрытий / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // *Пластические массы*. – 2003. – №4. – С.43.
5. Логанина, В.И. Оценка температурного воздействия на напряженное состояние защитно-декоративных покрытий с учетом пористости цементной подложки / В.И. Логанина, М.В. Арискин, М.А. Светалкина // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 67–76.
6. Berrocal, C.G. Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors / C.G. Berrocal, I. Fernandez, R. Rempling // *Struct. Infrastruct. Eng.* – 2020. – №17. – P. 124–139.
7. Luo, D. Concrete Beam Crack Detection using Tapered Polymer Optical Fiber Sensors / D. Luo, Y. Yue, P. Li, J. Ma, L. Zhang, Z. Ibrahim, Z. Ismail // *Measurement*. – 2016. – №88. – P.96–103.
8. Leung, C.K.Y. Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications / C.K.Y. Leung, K.T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H.C. Wu, M. Imai // *Mater. Struct.* – 2015. – №48. – P. 871–906.
9. Imai, M. Crack Detection Application for Fiber Reinforced Concrete Using BOCDA-Based Optical Fiber Strain Sensor / M. Imai, R. Nakano, T. Kono, T. Ichinomiya, S. Miura, M. Mure // *J. Struct. Eng.* – 2010. – №136. – P. 1001–1008.
10. Yan, T. Flexible strain sensors fabricated using carbon-based nanomaterials: A Review. *Curr. Opin / T. Yan, Z. Wang, Z. Pan // Solid State Mater. Sci.* – 2018. – №22. – P.213–228.
11. Morichika, S. Fatigue crack detection using a piezoelectric ceramic sensor / S. Morichika, H. Sekiya, O. Maruyama, S. Hirano, C. Miki // *Weld.World*. – 2020. – №64. – P.141–149.
12. Song, G. An overheight vehicle-bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers / G. Song, C. Olmi, H. Gu // *Smart Mater.Struct.* – 2007. – №16. – P. 462–468.
13. Williams, C.R.S. Multichannel fiber laser acoustic emission sensor system for crack detection and location in accelerated fatigue testing of aluminum panels / C.R.S. Williams, M.N. Hutchinson, J.D. Hart, M.H. Merrill, P. Finkel, W.R. Pogue III, G.A. Cranch // *APL Photon.* – 2020. – №5. – 030803.
14. Li, W. Multiple damaging and self-healing properties of cement paste incorporating microcapsules / W. Li, Z. Jiang, Q. Yu // *Constr. Build.Mater.* – 2020. – 255. – P.119302.

15. Мельников, А.В. Исследование деформированного состояния песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов / А.В. Мельников, Г.А. Новичков, Г.Г. Болдырев // *Международный журнал «Геотехника»*. – 2012. – №1. – С. 28–41.
16. Bansal, P. Finite element modelling of the fracture behaviour of brittle coatings / P. Bansal, P.H. Shipway, S.B. Leen // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – № 200. – P. 5318–5327.
17. Шнейдерова, В.В. Антикоррозионные лакокрасочные покрытия / В.В. Шнейдерова. – М.: Стройиздат, 1982. – 132 с.
18. Логанина, В.И. К методике оценки трещиностойкости защитно-декоративных покрытий / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // *Пластические массы*. – 2003. – №4. – С.43–44.
19. Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии: монография / под общ. науч. ред. С.Н. Леонovichа. – Минск: БНТУ, 2013. – 522 с.
20. Логанина, В.И. Оценка трещинообразования покрытий с помощью метода акустической эмиссии / В.И. Логанина, Н.И. Макридин, Л.В. Макарова, В.Н. Карпов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2003. – № 6 (534). – С. 35–38.
21. Болдырева, О.В. Определение перемещений железобетонной балки методом цифровой обработки образов / О.В. Болдырева // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2019. – №1. – С.23–28.
22. Sanal, Irem. Particle image velocimetry (PIV) to evaluate fresh and hardened state properties of self compacting fiber+reinforced cementitious composites (SC+FRCCs) / Irem Sanal, Nilüfer Özyurt Zihnioğlu, Ardan Hosseini // *Construction and Building Materials*. – 2015. – No 78. – P. 450–463.
23. Trivedi, N. Investigation on fracture parameters of concrete through optical crack profile and size effect studies / N. Trivedi, R.K. Singh, J. Chattopadhyay // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – No 10. – P. 119–140.
24. Boldyrev, G. Comparison of soil test data, obtained with different probes / G. Boldyrev, I. Guskov, S. Lavrov, V. Sidorchuk, D. Skopintsev // *Proceedings of the 3-d International Conference on the Flat Dilatometer*. – 2015. – Vol. 3.
25. Boldyrev, G.G. Particle image velocimetry and numeric analysis of sand deformations under a test plate / G.G. Boldyrev, A.V. Melnikov, V.A. Barvashov // *Proceedings of the 5-th European Geosynthetics Congress*. – 2012. – Vol. 1. – P. 685–691.

References

1. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // *Case Studies in Construction Materials*. – 2018. – Vol. 8. – P. 213–216.
2. Loganina, V.I. Assessment of the degree of destruction of protective and decorative coatings / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, V.G. Khristolyubov // *Lacquer-and-lacquer materials*. – 2004. – No. 9. – P. 14–18.
3. Loganina, V.I. Maintenance of quality of paint and varnish coverings of building products and designs // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1943–1947.
4. Loganina, V.I. On the methodology for assessing the crack resistance of protective and decorative coatings / V.I. Loganina, L.V. Makarova // *Plastic Masses*. – 2003. – No. 4. – P.43.
5. Loganina, V.I. Estimation of the temperature effect on the stress state of protective and decorative coatings, taking into account the porosity of the cement substrate / V.I. Loganina, M.V. Ariskin, M.A. Svetalkina // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 67–76.

6. Berrocal, C.G. Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors / C.G. Berrocal, I. Fernandez, R. Rempling // *Struct. Infrastruct. Eng.* – 2020. – №17. – P. 124–139.
7. Luo, D. Concrete Beam Crack Detection using Tapered Polymer Optical Fiber Sensors / D. Luo, Y. Yue, P. Li, J. Ma, L. Zhang, Z. Ibrahim, Z. Ismail // *Measurement*. – 2016. – №88. – P.96–103.
8. Leung, C.K.Y. Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications / C.K.Y. Leung, K.T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H.C. Wu, M. Imai // *Mater. Struct.* – 2015. – №48. – P. 871–906.
9. Imai, M. Crack Detection Application for Fiber Reinforced Concrete Using BOCDA-Based Optical Fiber Strain Sensor / M. Imai, R. Nakano, T. Kono, T. Ichinomiya, S. Miura, M. Mure // *J. Struct. Eng.* – 2010. – №136. – P. 1001–1008.
10. Yan, T. Flexible strain sensors fabricated using carbon-based nanomaterials: A Review. *Curr. Opin* / T. Yan, Z. Wang, Z. Pan // *Solid State Mater. Sci.* – 2018. – №22. – P.213–228.
11. Morichika, S. Fatigue crack detection using a piezoelectric ceramic sensor / S. Morichika, H. Sekiya, O. Maruyama, S. Hirano, C. Miki // *Weld.World*. – 2020. – №64. – P.141–149.
12. Song, G. An overheight vehicle-bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers / G. Song, C. Olmi, H. Gu // *Smart Mater.Struct.* – 2007. – №16. – P. 462–468.
13. Williams, C.R.S. Multichannel fiber laser acoustic emission sensor system for crack detection and location in accelerated fatigue testing of aluminum panels / C.R.S. Williams, M.N. Hutchinson, J.D. Hart, M.H. Merrill, P. Finkel, W.R. Pogue III, G.A. Cranch // *APL Photon.* – 2020. – №5. – 030803.
14. Li, W. Multiple damaging and self-healing properties of cement paste incorporating microcapsules / W. Li, Z. Jiang, Q. Yu // *Constr. Build.Mater.* – 2020. – 255. – P.119302.
15. Melnikov, A.V. The study of the deformed state of the sandy base using the method of digital image processing / A.V. Melnikov, G.A. Novichkov, G.G. Boldyrev // *International journal «Geotechnics»*. – 2012. – No1. – P. 28–41.
16. Bansal, P. Finite element modelling of the fracture behaviour of brittle coatings / P. Bansal, P.H. Shipway, S.B. Leen // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – № 200. – P. 5318–5327.
17. Shneiderova, V.V. Anti-corrosion coatings / V.V. Shneiderova. – M.: Stroyizdat, 1982. – 132 p.
18. Loganina, V.I. On the methodology for assessing the crack resistance of protective and decorative coatings / V.I. Loganina, L.V. Makarova // *Plastic masses*. – 2003. – N4. – C.43–44.
19. Strength and crack resistance of structural building materials under complex stress state: monograph / under total scientific ed. S.N. Leonovich. – Minsk: BNTU, 2013. – 522 p.
20. Loganina, V.I. Evaluation of crack formation in coatings using the acoustic emission method / V.I. Loganina, N.I. Makridin, L.V. Makarova, V.N. Karpov // *Construction*. – 2003. – No. 6 (534). – P. 35–38.
21. Boldyreva, O.V. Determination of displacements of a reinforced concrete beam by digital image processing. structural mechanics and calculation of coruzheny / O.V. Boldyreva. – 2019. – No. 1. – C.23–28.
22. Sanal, Irem. Particle image velocimetry (PIV) to evaluate fresh and hardened state properties of self compacting fiber+reinforced cementitious composites (SC+FRCCs) / Irem Sanal, Nilüfer Özyurt Zihnioglu, Ardalan Hosseini // *Construction and Building Materials*. – 2015. – No 78. – P. 450–463.
23. Trivedi, N. Investigation on fracture parameters of concrete through optical crack profile and size effect studies / N. Trivedi, R.K. Singh, J. Chattopadhyay // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – No 10. – P. 119–140.

24. Boldyrev, G. Comparison of soil test data, obtained with different probes / G. Boldyrev, I. Guskov, S. Lavrov, V. Sidorchuk, D. Skopintsev // Proceedings8. of the 3-d International Conference on the Flat Dilatometer. – 2015. – Vol. 3.

25. Boldyrev, G.G. Particle image velocimetry and numeric analysis of sand deformations under a test plate / G.G. Boldyrev, A.V. Melnikov, V.A. Barvashov // Proceedings of the 5-th European Geosynthetics Congress. – 2012. – Vol. 1. – P. 685–691.

УДК 691.54:577

DOI 10.54734/20722958_2023_3_85

*Ивановский государственный
политехнический университет*Россия, 153000, Иваново,
Шереметевский пр-кт, д. 21**Ветренко Татьяна Григорьевна**,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительство
и инженерные системы»
E-mail: veter_tg@mail.ru**Чеснокова Татьяна Вячеславовна**,
кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Естественные науки
и техносферная безопасность»
E-mail: 4esnokova@bk.ru*Ярославский государственный технический
университет*Россия, 150023, Ярославль,
Московский пр-т, д.88**Логинова Светлана Андреевна**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: sl79066171227@yandex.ru*Ivanovo State Polytechnic University*Russia, 153000, Ivanovo, 21,
Sheremetevsky pr-kt**Vetrenko Tatyana Grigoryevna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Construction and
Engineering Systems»
E-mail: veter_tg@mail.ru**Chesnokova Tatyana Vyacheslavovna**,
Candidate of Biological Sciences, Associate
Professor of the Department «Natural
Sciences and Technosphere Safety»
E-mail: 4esnokova@bk.ru*Yaroslavl State Technical University*Russia, 150023, Yaroslavl, 88, Moskovsky
prospect**Loginova Svetlana Andreevna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Structures»
E-mail: sl79066171227@yandex.ru

БИОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Т.Г. Ветренко, Т.В. Чеснокова, С.А. Логинова

Рассмотрен процесс биологической деструкции строительных материалов на цементном связующем. Исследованы биоцидные свойства мелкозернистого бетона на портландцементе разных отечественных производителей. Проведена сравнительная оценка показателей устойчивости цементных композитов к биокоррозии с биоцидными добавками и без таковых. Предложена эффективная технология получения строительных композитных материалов, устойчивых к биологической коррозии.

Ключевые слова: цементный композит, биоцидная добавка, фунгицидность, мелкозернистый бетон

BIOSTABILITY OF CEMENT CONSTRUCTION COMPOSITES

T.G. Vetrenko, T.V. Chesnokova, S.A. Loginova

The process of biological destruction of building materials on a cement binder is considered. The biocidal properties of fine-grained concrete on Portland cement from various domestic manufacturers have been studied. A comparative assessment of the indicators of resistance of cement composites to biocorrosion with and without biocidal additives was carried out. An effective technology for obtaining building composite materials resistant to biological corrosion is proposed.

Keywords: cement composite, biocidal additive, fungicidal activity, fine-grained concrete

Введение. В настоящее время известно несколько видов коррозии строительных материалов и конструкций. Среди них основное разрушающее воздействие и на строительные материалы, и на строительные конструкции оказывает биологическая коррозия. Она может быть обусловлена деятельностью бактерий, грибов, водорослей, лишайников и других микроорганизмов. Скорость биокоррозии зависит от свойств самих материалов и конструкций и условий их эксплуатации. Особенно активно протекает биоразрушение конструкций и материалов в условиях повышенной влажности и температуры, недостаточной вентиляции и загрязнений, которые служат питатель-

ной средой для микроорганизмов [1, 2]. В зданиях, зараженных микроорганизмами, наряду со снижением срока службы строительных конструкций нарушается и экологическая среда помещений. При определенных условиях она становится опасной для человека.

Поиск эффективных мер противодействия биоповреждению строительных материалов – одна из важнейших научных и практических задач, требующих решения. Становится все более очевидной необходимость осуществления в повседневной практике строительства оценки биологической стойкости применяемых строительных материалов, разработки и проведения мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий биоповреждения материалов и конструкций. В связи с этим исследования по изучению механизма биодеструкции цементных композитов, разработка и внедрение мероприятий по защите зданий и сооружений от воздействия биологической коррозии являются актуальными.

Предупреждение биокоррозии строительных конструкций может быть достигнуто путем придания им биоцидных свойств (бактерицидность, фунгицидность) [3, 4]. Наиболее эффективным способом повышения биостойкости и улучшения физико-механических свойств цементных композитов является получение модифицирующих и биоцидных добавок и использование их в технологическом процессе [3]. При этом важно, чтобы биоцидные добавки имели, с одной стороны, высокую степень активности, а с другой, не ухудшали физико-механические и технологические свойства бетонов в железобетонных конструкциях. Также биоцидные добавки не должны негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека.

Методы и материалы. В проводимых исследованиях для приготовления контрольного стандартного состава [5] мелкозернистых бетонов с биоцидными свойствами использовались: портландцемент по ГОСТ 31108 разных производителей; песок для строительных работ ГОСТ 8736 средней крупности ($M_k-2,0$) ООО «Хромцовский карьер», вода по ГОСТ 23732. Количество воды, входящее в состав жидких добавок, учитывалось при дозировании расчетного количества воды в основном составе смеси.

В качестве биоцидных добавок исследовали: добавку на основе гексагидро-1,3,5-три(2гидрокси-этил)-сим-триазина (бакцид), добавку NaF и добавку Na_2SO_4 . Биоцидные добавки вводились в раствор с водой затворения в следующих количествах к массе портландцемента: бакцид – 0,3 %, 0,5 %, 1,0 %; NaF – 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %; Na_2SO_4 – 1,5 %, 3,0 %, 4,5 %.

Экспериментальная часть. Использование добавок NaF и Na_2SO_4 в строительном производстве достаточно изучено. Исследование возможности применения добавки на основе гексагидро-1,3,5-три(2гидрокси-этил)-сим-триазина для улучшения качества цементных бетонов проводится нами впервые.

Раствор добавки на основе гексагидро-1,3,5-три(2гидрокси-этил)-сим-триазина характеризуется высокой долговечностью и стабильностью pH среды, превосходной антимикробной активностью (проявляет активность против как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий), также отсутствием пены. Добавка отличается низкой токсичностью, простотой использования жидкого раствора, полной растворимостью в воде при любых разбавлениях, что обеспечивает удобство применения данного препарата.

Целью исследования являлось выявление негативных свойств бакцида, а также определение наилучшей концентрации добавки при ее введении в раствор мелкозернистого бетона.

Первоначально проводились исследования бактерицидности бетонов, не содержащих в своем составе биоцидных добавок. Бактерицидность бетонов определяли по методике, изложенной в [6] (метод 2), как наиболее информативной. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Бактерицидные свойства бетонов

Состав	Марка цемента, производитель	Результаты определения (диаметр зоны задержки роста микробов)	Степень бактерицидного действия образцов бетона на тест-микробы
1	ЦЕМ I 42,5 Н «Белгородский цемент»	От 10 до 15 мм	Слабое бактерицидное действие
2	ЦЕМ I 42,5 Н «Осколцемент»	Отсутствие зоны задержки роста микробов	Не обладает бактерицидным действием
3	ЦЕМ I 42,5 Б «Мордовцемент»	От 10 до 15 мм	Слабое бактерицидное действие
4	ЦЕМ I 42,5 Н «ЮУГПК»	От 10 до 15 мм	Слабое бактерицидное действие

Было установлено, что практически у всех композитов, приготовленных с использованием рассмотренных цементов, наблюдаются слабо выраженные бактерицидные свойства.

Определение бактерицидного действия [7] различных биоцидных добавок проводили на мелкозернистом бетоне, приготовленном с использованием портландцемента «Осколцемент». Результаты исследований приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Степень бактерицидного действия добавок в составе мелкозернистого бетона

Состав	Содержание биоцидной добавки в бетоне, %		Результаты определения (диаметр зоны задержки роста микробов)	Степень бактерицидного действия на тест-микробы
1	Бакцид	0,3	$D = 15 \div 20$ мм	Умеренно выраженное бактерицидное действие
2		0,5	$D > 20$ мм	Сильно выраженное
3		1,0	$D > 20$ мм	Сильно выраженное
4	NaF	1,0	$D = 10 \div 15$ мм	Слабое
5		1,5	$D = 10 \div 15$ мм	Слабое
6		2,0	$D = 15 \div 20$ мм	Умеренно выраженное
7	Na ₂ SO ₄	1,5,0	$D = 10 \div 15$ мм	Слабое бактерицидное
8		3,0	$D = 15 \div 20$ мм	Умеренно выраженное
9		4,5	$D = 15 \div 20$ мм	Умеренно выраженное

Основной характеристикой биоцидности композитных материалов является фунгицидность [8-10], т.е. способность к сопротивлению разрушительному действию плесневелых грибов и продуктов их жизнедеятельности.

На рис. 1–3 показано изменение коэффициента биостойкости мелкозернистого бетона в зависимости от вида используемой добавки.

Были проведены исследования по оценке влияния наиболее эффективной биоцидной добавки «бакцид» на прочностные характеристики цементных композитов [11–14]. Влияние данной добавки на прочность по сравнению с контрольным составом незначительно, так как при введении добавки в количестве 0,3 % и 0,5 % от массы цемента снижения прочности не выявлялось.

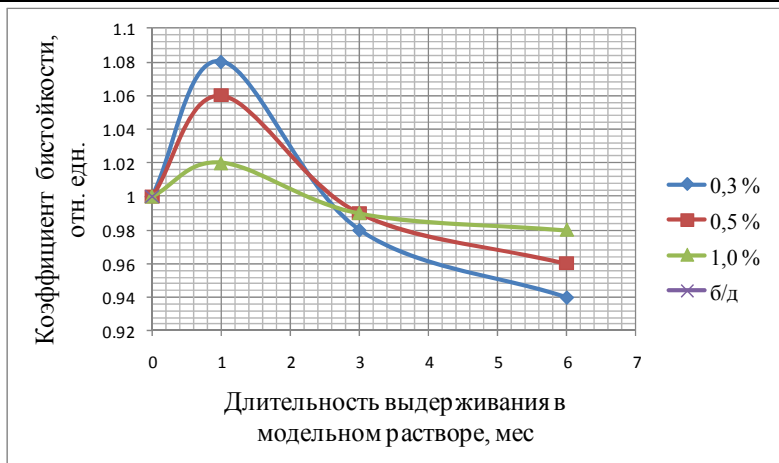


Рис. 1. Влияние содержания добавки «бакцид» (% от массы цемента) на биостойкость цементного композита

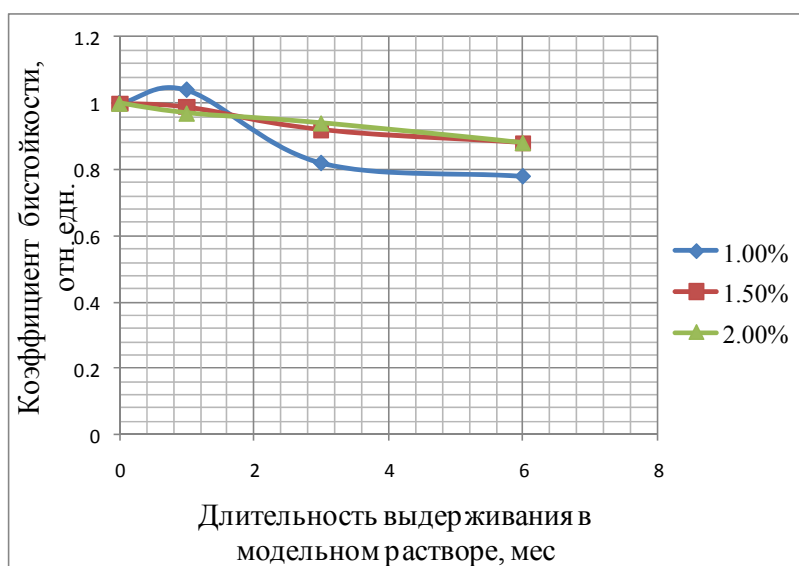


Рис. 2. Влияние содержания добавки NaF (% от массы цемента) на биостойкость цементного композита

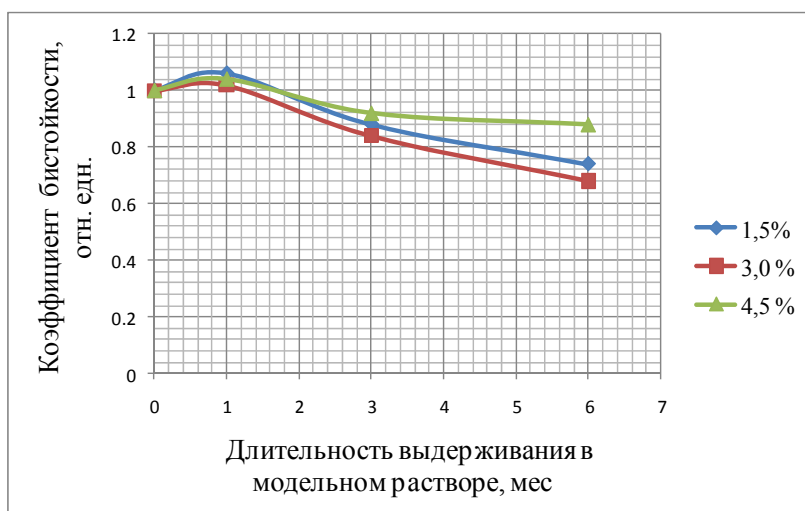


Рис. 3. Влияние содержания добавки Na₂SO₄ (% от массы цемента) на биостойкость цементного композита

Для получения комплексной добавки полифункционального действия на основе бакцида были выполнены исследования по введению в её состав дополнительных компонентов, способствующих улучшению физико-механических свойств мелкозернистого бетона и цементных композитов в целом.

Выводы. На основании результатов исследования был предложен способ повышения биостойкости цементных композитов за счет введения биоцидных соединений в их состав в процессе изготовления; установлены количественные зависимости изменения коэффициента биостойкости композитов от вида и процентного содержания вводимой биоцидной добавки; выявлено повышение биостойкости композитов при введении в их состав биоцидной добавки на основе соединений гексагидро-1,3,5-три(2гидрокси-этил)-сим-триазина в количестве 0,3-0,5 % от массы портландцемента без снижения прочности.

Список литературы

1. Runkiewicz, L. Wpływ obecności grzybów pleśnowych w budynkach na zdrowie / L. Runkiewicz // Ceramika budowlana. – 2016. – № 4. – P. 12–13.
2. Runkiewicz, L. Wpływ korozji na zagrożenia i awaryjność obiektów budowlanych / L. Runkiewicz // Przegląd budowlany. – 2016. – N 12. – P. 32–37.
3. Дергунова, А.В. Биодеструкция и биозащита строительных композитов: автореф... канд. техн. наук: 05.23.05.: защищена 13.05.2011 / Дергунова Анна Васильевна.
4. Родин, А.И. Кинетика набора прочности биоцидных цементов / А.И. Родин, В.Т. Ерофеев, А.И. Пустограф, А.В. Еремин [и др.] // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 88–97.
5. ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Методы испытаний и оценка эффективности. – Введ. 2008-12-10. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 20 с.
6. Рекомендации по приготовлению и применению биоцидных строительных растворов и бетонов: утв. НИИЖБ Госстроя СССР 12.07.1987. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР; Киев: КИСИ Минвуза УССР, 1987. – 23 с.
7. ГОСТ 9.048-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневелых грибов. – Введ. 1989-06-26. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 22 с.
8. Шарафутдинов, К.Б. Исследование грибостойкости цементного камня / К.Б. Шарафутдинов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 3. – С. 223–227.
9. Ерофеева, И. Исследование грибостойкости и фунгицидности цементных композитов в среде мицелиальных грибов / И. Ерофеева // Русский инженер. – 2018. – № 2 (59). – С. 44–47.
10. Хуторской, С.В. Биокоррозия и биостойкость известковых композитов / С.В. Хуторской, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2011. – № 14. – С. 132–135.
11. Носкова, А.В. Изучение коррозионной активности дезинфектанта «бакцид» / А.В. Носкова // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2009. – № 1 (1). – С. 50–52.

References

1. Influence of the presence of fungi in buildings on health // Building ceramics. – 2016. – N 4. – P. 12–13. [in Polish]
2. Runkiewicz, L. The effect of corrosion on the threats and accidents of construction projects / L. Runkiewicz // Construction Review. – 2016. – N 12. – P. 32–37. [in Polish]
3. Dergunova, A.V. Biodegradation and bioprotection of building composites: abstract of cand. of Sciences: 05.23.05.: defended 13.05.2011 / Dergunova Anna Vasilievna. [in Russian]

4. Rodin, A.I. Kinetics of strength development of biocidal cements / A.I. Rodin, V.T. Erofeev, A.I. Pustograph, A.V. Eremin and others // Bulletin of MGSU. – 2014. – No. 12. – P. 88–97. [in Russian]
5. GOST 30459-2008. Additives for concrete and mortars. Test methods and performance evaluation. – Input. 2008-12-10. – M.: Publishing House of Standards, 2008. – 20 p.
6. Recommendations for the preparation and use of biocidal mortars and concretes: approved. NIIZHB Gosstroy of the USSR 07/12/1987. – M.: NIIZhB Gosstroy of the USSR, Kyiv: KISI of the Ministry of Higher Education of the Ukrainian SSR, 1987. – 23 p.
7. GOST 9.048-89. Unified system of protection against corrosion and aging. Technical products. Methods of laboratory tests for resistance to the impact of moldy fungi. – Input. 1989-06-26. – M.: Publishing house of standards, 1989. – 22 p.
8. Sharafutdinov, K.B. Study of the fungus resistance of cement stone / K.B. Sharafutdinov // Chemistry. Ecology. Urbanistics. – 2021. – Vol. 3. – P. 223–227 [in Russian]
9. Erofeeva, I. Study of fungi resistance and fungicidal properties of cement composites in the environment of filamentous fungi / I. Erofeeva // Russian engineer. – 2018. – No. 2 (59). – P. 44–47 [in Russian]
10. Khutorskoy, S.V. Biocorrosion and biostability of lime composites / S.V. Khutorskoy, V.T. Erofeev, V.F. Smirnov // Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – 2011. – No. 14. – P. 132–135 [in Russian]
11. Noskova, A.V. Study of the corrosive activity of the disinfectant «Bakcid» / A.V. Noskova // Russian journal Problems of veterinary sanitation, hygiene and ecology. – 2009. – No. 1 (1). – P. 50–52 [in Russian]

УДК 666.94

DOI 10.54734/20722958_2023_3_91

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: +7 (8452) 99-86-03;
факс: +7 (8452) 99-86-04

Ивашенко Юрий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (495) 781-80-07,
факс: +7 (499) 183-44-38

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры «Основы
архитектуры и художественных
коммуникаций»

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Decan of
faculty «Management of territories»
E-mail: tarov60@mail.ru

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politechnicheskaya St.,
tel.: +7 (8452) 99-86-03;
fax: +7(8452) 99-86-04

Ivashchenko Yuri Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Building Materials, Structures
and Technologies»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (495) 781-80-07,
fax: +7 (499) 183-44-38

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences,
Senior Lecturer of the Department
«Fundamentals of Architecture and Artistic
Communications»

ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

О.В. Тараканов, Ю.Г. Ивашенко, И.В. Ерофеева

Рассмотрены основные механизмы влияния компонентов комплексных противоморозных добавок в бетон на состав продуктов гидратации, структурообразование и твердение цементных материалов, а также на возможность сохранения жидкой фазы бетона, твердеющего при отрицательных температурах. Выполнены эксперименты по оценке влияния фактора водоцементного отношения на кинетику твердения бетона на морозе. Разработаны принципы проектирования комплексных противоморозных добавок в бетон.

Ключевые слова: комплексные противоморозные добавки, строительные растворы и бетоны, добавки-электролиты, пластифицирующие добавки, температура замерзания, льдообразование, гидроалюминаты и гидросиликаты кальция, структурообразование, пластическая прочность, кинетика твердения, критическая прочность, принципы проектирования противоморозных добавок

THE EFFECT OF ORGANOMINERAL ADDITIVES ON THE FORMATION OF MICROSTRUCTURE AND KINETICS OF CONCRETE HARDENING AT NEGATIVE TEMPERATURES

O.V. Tarakanov, Y.G. Ivashchenko, I.V. Erofeeva

The main mechanisms of the influence of the main components of complex antifreeze additives in concrete on the composition of hydration products, structure formation and hardening of cement materials, as well as on the possibility of preserving the liquid phase of concrete hardening at negative temperatures are considered. Experiments were carried out to assess the influence of the water–cement ratio factor on the kinetics of concrete hardening on the frost. The principles of designing complex antifreeze additives in concrete have been developed.

Keywords: complex antifreeze additives, mortars and concretes, electrolyte additives, plasticizing additives, freezing point, ice formation, hydroaluminates and calcium hydrosilicates, structure formation, plastic strength, hardening kinetics, critical strength, principles of designing antifreeze additives

Интенсивно развивающееся монолитное строительство в настоящее время требует разработки новых подходов к проектированию составов бетона и технологий бетонирования при отрицательных температурах.

Один из основных способов повышения эффективности зимнего бетонирования предусматривает использование модифицирующих добавок, большинство из которых являются комплексными.

В состав добавок часто входят супер- и гиперпластификаторы (СП и ГП), а также ингредиенты, ускоряющие твердение и повышающие прочность. Положительным фактором при использовании комплексных добавок является возможность достижения синергетических эффектов. Например, применение СП и ГП с ускорителями твердения позволяет получать более пластичные смеси, а ускоряющий компонент способствует сокращению времени набора бетоном требуемой прочности и компенсирует замедляющее влияние СП и ГП [1, 2, 3]. Кроме того, комплексные добавки в определенной степени позволяют нивелировать влияние изменчивости химико-минералогического цемента на кинетику твердения и прочность бетона.

В настоящее время строительный рынок представлен широкой номенклатурой комплексных добавок, в том числе и противоморозных.

Задача исследований заключается в системном анализе механизмов действия компонентов добавок на состав продуктов гидратации и микроструктуру цементных материалов, во многом определяющих основные физико-механические свойства бетона и его долговечность. Задача еще более усложняется, когда формирование ранней структуры и прочности бетона происходит в условиях отрицательных температур.

Следует отметить, что в большинстве своем противоморозные добавки предназначены для «теплого» бетона, т.е. бетона, за которым должен осуществляться уход до набора критической прочности. Добавок, обеспечивающих твердение на морозе «холодного» бетона, значительно меньше, и, кроме того, большинство из них позволяют бетону твердеть при температуре не ниже минус 15–20°C. Однако на практике нередки случаи, когда вследствие технологических сбоев и недоработок «теплый» бетон твердеет в условиях реальных низких температур. В этих случаях, как правило, бетонная смесь размораживается (особенно в тонкостенных конструкциях) со всеми вытекающими последствиями.

В современной литературе представлено весьма ограниченное количество работ, посвященных формированию микроструктуры бетона, твердеющего на морозе. Известно [4, 5], что при температурах ниже минус 15–20°C процессы гидратации замедляются и практически прекращаются, и это объясняется физическим состоянием воды в структуре цементного камня. При температуре, близкой к 0°C, положительная температура в цементном камне сохраняется в течение длительного времени вследствие экзотермической реакции гидратации и присутствия в жидкой фазе растворенных солей и примесных ионов. Часть воды даже при температурах около минус

60°C может находиться в микропорах цементного камня и бетона в жидком состоянии, и температура замерзания в порах, различающихся по диаметрам, будет различной. По мере уменьшения размеров пор температура замерзания воды в них будет понижаться.

Основными факторами, влияющими на температуру замерзания жидкой фазы в цементном камне и бетоне, являются значения показателей удельной поверхности исходного материала (цемента) и образующихся в процессе гидратации гидратных фаз, химико-минералогического состава вяжущего, характера пористости структуры цементного камня и бетона и присутствие химических добавок и примесей.

Таким образом, химические модификаторы бетона являются основным инструментом, позволяющим в широких пределах регулировать процессы раннего структурообразования и кинетику твердения цементных материалов в условиях отрицательных температур. Весьма важное значение имеет понимание основных механизмов действия добавок на состав продуктов гидратации цемента, во многом определяющих раннее структурообразование и раннюю прочность и, в целом, кинетику твердения цементных материалов на морозе.

Известно, что фазовый состав продуктов гидратации цементных материалов, твердеющих при отрицательных температурах, не отличается от таковых для цементных материалов нормального твердения [4, 5], и, более того, автор [4] отмечает, что в некоторых случаях наблюдается углубление процессов гидратации в цементном камне, замороженном в раннем возрасте (12–24 часа), вследствие накопления гелевых новообразований, которые затем интенсивно выкристаллизовываются при наступлении положительных температур.

Следует отметить, что если процессы гидратации цемента, замедляющиеся при отрицательных температурах, могут возобновляться при положительных, то нарушения структуры цементного камня и бетона, вызываемые замораживанием и оттаиванием, необратимы и приводят к снижению основных физико-механических свойств материала.

Анализ технической литературы показал, что наиболее благоприятные условия для миграции воды создаются при медленном охлаждении влажного бетона. При быстром охлаждении вода в структуре цементного камня замерзает в виде мелких кристаллов, равномерно распределенных по материалу. При медленном охлаждении бетона наибольшему разрушению подвергаются поверхностные слои. Здесь хотелось бы упомянуть об одном из уникальных свойств льда: кристаллизуясь, лед не допускает в свою структуру каких-либо других молекул, кроме молекул воды. При замерзании воды воздух, растворенный в ней, будет постоянно выталкиваться кристаллизующимся льдом и накапливаться на границе льда и замерзающей воды. Если вода замерзает медленно, то количество выталкиваемого воздуха невелико, и оно постоянно снижается за счет диффузии. При высоких скоростях замерзания выталкивание идет быстрее диффузии, и на границе растущего льда формируется слой с повышенным содержанием воздуха. Воздух растворяется в воде, но не может внедриться в кристаллическую решетку, что и является причиной образования воздушных пузырьков во льду. При быстром замораживании бетона кристаллы льда, содержащие мельчайшие пузырьки воздуха в своем объеме, будут более «дефектными», чем кристаллы льда, образующиеся при медленном охлаждении бетона (в этом случае растворенный воздух будет выталкиваться к поверхности, и кристаллы льда будут менее прочными). С другой стороны, при медленном охлаждении бетона ледяные включения будут находиться в окружении тонкой прослойки воздушных пузырьков вблизи поверхности кристаллов, что, в свою очередь, может оказать положительное влияние на структуру цементной матрицы, поскольку пузырьки могут выступать как демпфирующие элементы, смягчающие давление, возникающее от кристаллизующегося в порах и капиллярах льда.

Основными задачами при использовании химических добавок в технологии зимнего бетонирования являются следующие:

1. Создание благоприятных условий для твердения бетона при отрицательных температурах с точки зрения обеспечения незамерзающей жидкой фазы. Для «теп-

лого» бетона это достигается прогревом конструкций, а для «холодного» – применением добавок, понижающих температуру замерзания жидкой фазы.

2. Анализ механизмов действия компонентов добавок на состав продуктов гидратации, на формирование ранней структуры, на кинетику твердения и прочность бетона.

Известно, например, что практически все органические пластифицирующие добавки замедляют гидратацию силикатных минералов цемента, а на алюминатные фазы оказывают стабилизирующее влияние [1–3, 8]. Для зимнего бетонирования это является негативным фактором, поскольку современные противоморозные добавки в большинстве своем являются комплексными, и небольшая передозировка органического компонента может негативно повлиять на формирование ранней структуры и прочности бетона. С другой стороны, противоморозного компонента (особенно в случаях «холодного» бетона) в комплексной смеси может оказаться недостаточно, например, при температурах ниже минус 15–20°C.

Задачей исследований являлась разработка принципов проектирования комплексных противоморозных добавок с учетом механизмов действия основных компонентов на состав продуктов гидратации, структурообразование и твердение цементных материалов.

Принципы проектирования комплексных добавок должны быть разработаны на основе анализа влияния компонентов добавок и их дозировок на создание незамерзающей жидкой фазы цементных систем, процессы изменения пластической прочности и кинетики твердения при отрицательных температурах.

При рассмотрении возможности применения органических и неорганических веществ в качестве противоморозных добавок важными являются два фактора:

1. Температура замерзания водных растворов химических веществ.

2. Возможность участия добавок в формировании гидратных фаз в процессе гидратации цементных материалов. К примеру, хлорное железо и нитрат кальция хотя и создают незамерзающую жидкую фазу, но практически не ускоряют твердение бетона даже при небольшой (–5°C) отрицательной температуре [4].

Рассматривая влияние неорганических веществ на состояние жидкой фазы цементных систем, необходимо иметь представление о характере влияния гидратированных ионов добавок на структуру воды. Например, некоторые ионы характеризуются положительной гидратацией, а некоторые – отрицательной [9]. Ионы кальция, массово присутствующие в жидкой фазе цементных систем, оказывают влияние на стабилизацию клатратных структур воды вследствие образования гексааквакомплексов $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{O}_6)]^{2+}$, в центре которых находится ион кальция. Подобные комплексы могут образовывать также другие ионы, которые влияют на свойства воды. Структура воды и степень ее упорядоченности во многом зависят от свойств и концентрации растворенных веществ, что, в целом, влияет на растворяющую способность воды. В жидкой фазе цементных систем в присутствии множества ионов структура воды еще более усложняется, что, в свою очередь, оказывает влияние на процессы формирования гидратов.

Следует учитывать, что при введении в цемент растворов добавок первичным актом является адсорбция молекул воды и растворенных ионов поверхностью цементных частиц. Параллельно протекают процессы растворения, поверхностной гидратации и образования зародышей кристаллогидратов. Вполне естественно, что в присутствии примесных ионов структура гидратных фаз искажается и нарушается вследствие химического межмолекулярного взаимодействия элементов системы. В присутствии катионов добавок нарушается нормальный порядок формирования кремнекислородных мотивов гидросиликатов кальция (ГСК)), в результате чего формируются искаженные, напряженно-деформированные структуры ГСК. Об этом свидетельствуют ступенчатые и «размытые» отражения ГСК на рентгенограммах цементного камня, гидратированного в присутствии добавок [3]. Характер этих отражений свидетельствует о возможности внедрения ионов, находящихся в системе, в пустоты и полости гидратов с формированием деформированных структур [10]. Авторы [1, 6] отмечают, что введение электролитов в цементные материалы приводит

к изменению условий образования льда и искажению его структуры. С увеличением концентрации электролита в жидкой фазе требуется увеличить переохлаждение раствора, чтобы обеспечить возможность протекания энергетически затруднительного процесса выкристаллизовывания льда.

Рассматривая возможность применения химических веществ в качестве противоморозных добавок в бетон, следует отметить, что некоторые неорганические вещества, снижающие температуру замерзания воды, тем не менее не могут быть использованы в качестве противоморозных добавок.

Изменение структуры воды вследствие воздействия температуры, давления, вида и концентрации растворенных веществ отражается на ее растворяющей способности. При понижении температуры увеличиваются количество молекул, связанных водородными связями, и величина диэлектрической постоянной системы. При повышении температуры водородные связи разрываются, следовательно, снижается способность воды удерживать ионы в гидратированном состоянии.

При повышении температуры растворяющая способность воды должна уменьшаться, а при понижении увеличиваться. Однако зависимость между растворимостью различных веществ и температурой раствора является различной. Например, растворимость сульфатов и карбонатов при повышении температуры вначале увеличивается, а затем уменьшается и при температуре 250–300°C в несколько раз меньше, чем при температуре 25°C. Хлориды растворяются лучше при более высоких температурах, а фосфаты – при более низких, т.е. растворимость большинства химических соединений проходит через максимум или минимум или носит колебательный характер.

Вполне естественно, что в гетерогенной цементной системе мы имеем дело с результирующим действием многих факторов, в то время как причину явлений можно только предполагать.

Важным фактором при проектировании составов противоморозных добавок является химико-минералогический состав цемента. Например, установлено [4], что введение в качестве противоморозных добавок электролитов является более эффективным для бетонов на низкоалюминатных цементах, с увеличением алюминатности в цементе эффективность добавок уменьшается и может приводить даже к отрицательным результатам.

Негативным фактором применения ПАВ и электролитов в качестве противоморозных добавок в бетон в алюминатных цементах является их стабилизирующее влияние на гидраты AFm- и Aft-фаз. В наших исследованиях [3] установлено, что основными механизмами повышения прочности алюминатных фаз цемента в присутствии добавок-ускорителей твердения являются увеличение количества гидратов и стабилизация кристаллов AFm-фаз вследствие поляризационного влияния ионов добавок на состояние межслоевой воды. Система, состоящая из призматических и гексагональных гидроалюминатов кальция, а также образующихся двойных и тройных солей-гидратов (гидрохлор-, гидронитро-, гидронитриалюминатов кальция), обладает большей структурной прочностью по сравнению с каркасом из кубических кристаллов C_3AH_6 ; поэтому пластическая и ранняя прочность цементных систем с подобными добавками возрастает [3]. Опасность заключается в том, что с течением времени, а также под воздействием внешних факторов гидраты AFm-фаз способны перекристаллизовываться с высвобождением межслоевой воды и соответствующим разуплотнением структуры вследствие различных плотностей гидратов AFm-фаз и C_3AH_6 .

С увеличением дозировок добавок стабилизирующее влияние ускорителей твердения и противоморозных добавок возрастает.

Отметим, что характер влияния повышенных дозировок добавок-электролитов в значительной степени зависит от вида катиона добавки. Так, при увеличении дозировки добавки $CaCl_2$ с 1 до 5 % от массы вяжущего прочность C_4AF возрастает, а при увеличении количества $NaCl$ – в ранние сроки снижается (табл. 1 [3]).

Влияние добавок CaCl_2 и NaCl на прочность C_4AF

Состав	Количество добавки, % от массы вяжущего	Прочность, МПа, через (сут)/прочность, % по сравнению с контрольным составом					
		1	3	7	14	28	60
C_4AF В/Т = 0,5 без добавки	–	10,1	11,1	8,5	7,4	7,5	8,0
с добавкой CaCl_2	1	<u>12,1</u> 119	<u>16,6</u> 149	<u>19,1</u> 224	<u>19,9</u> 269	<u>22,6</u> 301	<u>26,6</u> 332
–“–	5	<u>18,8</u> 186	<u>20,3</u> 183	<u>25,9</u> 304	<u>29,3</u> 396	<u>31,9</u> 425	<u>33,2</u> 415
с добавкой NaCl	1	<u>6,8</u> 67	<u>12,6</u> 113	<u>11,2</u> 132	<u>13,3</u> 179	<u>13,7</u> 183	<u>14,6</u> 183
–“–	5	<u>5,6</u> 55	<u>8,0</u> 72	<u>10,0</u> 118	<u>10,9</u> 147	<u>15,9</u> 212	<u>16,6</u> 208

Выполненные исследования показали, что добавки хлоридов, нитратов и нитритов кальция и натрия, ацетатов кальция и натрия повышают пластическую и раннюю прочность цементных материалов (табл. 2).

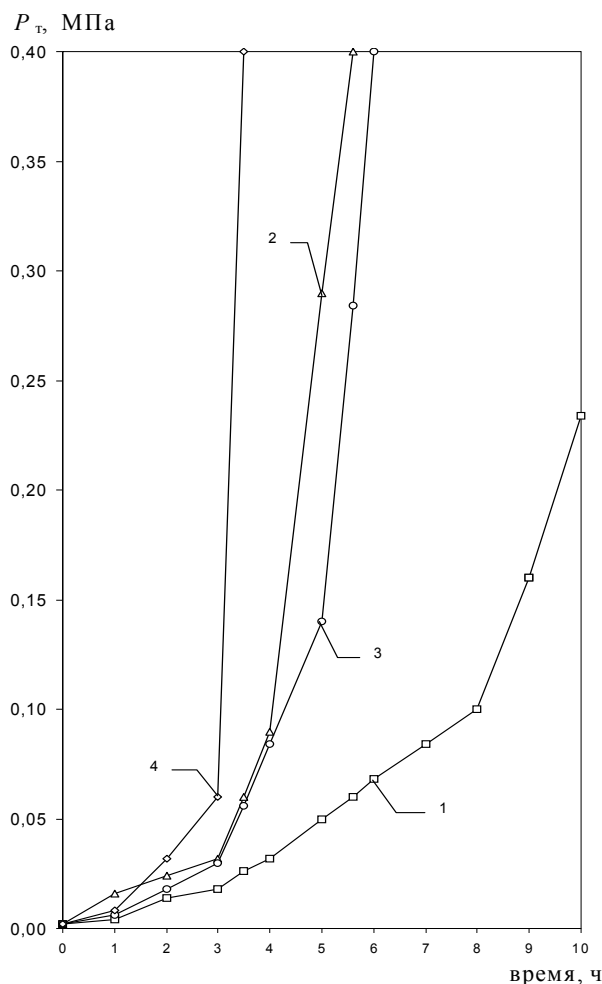
Т а б л и ц а 2

Кинетика твердения цементно-песчаных растворов с добавками-ускорителями
при положительных температурах

Состав	Кол-во добавки, % от массы	Прочность при сжатии, МПа/прочность, % по сравнению с контрольным составом			
		Продолжительность твердения, сут			
		3	7	14	28
ЦЕМ I/A 42,5 Ц:П=1:3 В/Ц=0,5 Без добавки	–	16,5	27,5	32,5	39,0
С добавкой NaCl	1	<u>19,8</u> 120	<u>32,7</u> 119	<u>38,0</u> 117	<u>44,8</u> 115
С добавкой CaCl_2	1	<u>20,3</u> 123	<u>34,4</u> 125	<u>39,0</u> 120	<u>46,8</u> 120
С добавкой NaNO_2	1	<u>18,9</u> 115	<u>30,2</u> 110	<u>37,4</u> 115	<u>42,9</u> 110
С добавкой $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	1	<u>19,5</u> 118	<u>31,6</u> 115	<u>35,7</u> 110	<u>43,6</u> 112
С добавкой CH_3COONa	1	<u>18,9</u> 115	<u>30,8</u> 112	<u>35,1</u> 108	<u>43,6</u> 112
С добавкой $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	1	<u>19,5</u> 118	<u>31,6</u> 115	<u>38,0</u> 117	<u>44,8</u> 115

Исследования кинетики начального структурообразования цементно-песчаных растворов при температуре минус 15°C с добавками электролитов в количестве 10 % от массы цемента, выполненные ранее [7], показали, что по характеру влияния на интенсивность льдообразования добавки можно расположить в последовательности: $\text{CaCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaNO}_2 > \text{NaCl}$.

Установлено, что смеси с добавкой NaCl сохраняются в пластичном состоянии при температуре минус 15°C в течение 6 часов и более, в отличие от составов с другими добавками. Аналогичные результаты были получены для других цементов, и, в целом, хлорид кальция при повышенных дозировках значительно ухудшает технологические параметры смесей. С этой точки зрения предпочтительны добавки NaCl, KCl и NaNO₂ (см. рисунок).



Изменение пластической прочности цементно-песчаного раствора 1:2, В/Ц = 0,53, твердеющего при $t = -15^\circ\text{C}$ [7].

Старооскольский ПЦ 400Д0:

1 – с добавкой NaCl (10%); 2 – с добавкой KCl (10%);
3 – с добавкой NaNO₂ (10%); 4 – с добавкой CaCl₂ (10%)

Установлено также, что при температурах ниже минус 10°C формирование собственной структуры цементных систем практически прекращается и процессы льдообразования становятся определяющими [7].

С учетом того что температура замерзания водных растворов солей пропорциональна моляльной концентрации, очевидно, что даже при повышенных дозировках добавок (до 10 % от массы цемента) создать незамерзающую жидкую фазу бетона при температурах минус 20°C и ниже практически невозможно.

В то же время в инструкциях по применению многих современных комплексных противоморозных добавок указывается, что они обеспечивают твердение бетона при температурах до минус 25°C при весьма небольших дозировках (5–7 % от массы цемента).

Что касается цементных систем, гидратирующихся в присутствии добавок, можно говорить лишь о результирующем их влиянии на изменение структуры воды и на формирование зародышей гидратных фаз.

В отношении силикатных фаз цемента следует учитывать индукционное влияние ионов на связи Si–O и Ca–O в структуре островных ортосиликатов (C_3S и β - C_2S), вследствие чего поверхность частиц становится более химически и энергетически неоднородной, что приводит к уменьшению кратности связей, их ослаблению и разрыву и, как следствие, к активации гидратационных процессов. Сложность оценки влияния катионов и анионов добавок заключается в том, что в гетерогенных цементных системах формирование гидроалюминатов и гидросиликатов кальция происходит в одной системе, что приводит к образованию сложного поликристаллического материала, состоящего на ранних стадиях из псевдокристаллической массы гидросиликатов кальция, «армированной» кристаллическими образованиями AFm- и Aft-фаз.

Как отмечалось выше, в технологии зимнего бетонирования важнейшими факторами являются создание в присутствии добавок незамерзающей жидкой фазы и участие добавок в формировании микроструктуры цементного камня.

Говорить о создании незамерзающей жидкой фазы в цементных материалах, твердеющих на морозе, можно только при значительных дозировках противоморозных компонентов (в пределах 15 % от массы цемента). Кроме того, растворенные вещества значительно уменьшают коэффициент объемного расширения льда в порах цементного камня и тем сильнее, чем выше их концентрация.

При проектировании составов противоморозных добавок важно иметь представление о характере влияния противоморозных компонентов (в том числе при повышенных дозировках) на формирование ранней структуры бетона, чтобы не допустить чрезвычайно быстрого схватывания бетонной смеси и потери ее подвижности. Еще более опасным фактором может оказаться раннее замораживание бетона в присутствии повышенных дозировок противоморозных компонентов, когда из-за раннего схватывания и малой прочности слабозакристаллизованная структура может оказаться неспособной противостоять воздействию отрицательных температур, в результате подобная структура может быть подвержена значительным деструктивным воздействиям.

В подобных случаях следует либо дожидаться достижения бетоном критической прочности (например, с помощью кратковременного прогрева), либо вообще отказаться от использования противоморозных компонентов и подвергать бетон раннему замораживанию, когда структура не сформирована и негативные воздействия отрицательных температур будут не столь существенны. Мелкозернистые бетоны в меньшей степени подвержены деструкции после раннего замораживания до набора критической прочности.

Одним из факторов, влияющих на прочность и кинетику твердения бетона на морозе, является фактор водоцементного отношения. Именно с этой целью в состав большинства современных противоморозных добавок вводятся водопонижающие компоненты – СП и ГП. Автор [4] отмечает, что введение электролитов более эффективно для бетонов с низким В/Ц.

С целью определения характера влияния противоморозных добавок на кинетику твердения «холодного» бетона была изготовлена серия образцов тяжелого бетона с различным значением В/Ц, твердевших при температуре минус 12°C в течение 28 суток. Установлено, что во всех случаях эффективность противоморозных добавок выше для бетона с более низким показателем В/Ц. Наилучшие результаты получены для добавок на основе кальциевых солей (табл. 3).

Известно, что процессы льдообразования в бетоне с противоморозными добавками протекают одновременно со структурированием. Вследствие того что процесс льдообразования в бетоне в присутствии добавок ослаблен, при твердении на морозе в бетоне не происходит значительных деструктивных явлений. Однако все определяется концентрацией и видом добавки, температурой твердения, составом вяжущего и бетона. Как отмечалось выше, большинство современных противоморозных добавок являются комплексными, содержащими наряду с противоморозными компонентами также пластификаторы.

Кинетика твердения тяжелого бетона с противоморозными добавками при отрицательной температуре

Состав	Кол-во добавки, % от массы	Температура твердения, °С	Прочность в % от норм. R_{28}		
			Период твердения, сут		
			7	14	28
ЦЕМ II/A 42,5 Н Состав бетона Ц:П:Щ:В 1:2,09:3,93:0,52 $\rho = 330 \text{ кг/м}^3$ $R_{28} = 33,0 \text{ МПа}$ Без добавки	—	18	30	86	100
С добавкой NaCl	8	–12	14	23	35
С добавкой CaCl_2	8	–12	16	26	38
С добавкой NaNO_2	8	–12	12	22	33
С добавкой $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	8	–12	14	25	33
С добавкой CH_3COONa	8	–12	11	21	32
С добавкой $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	8	–12	12	24	31
ЦЕМ II/A 42,5 Н Состав бетона Ц:П:Щ:В 1:2,09:3,93:0,56 $\rho = 330 \text{ кг/м}^3$ $R_{28} = 30,5 \text{ МПа}$ Без добавки	—	18	27	85	100
С добавкой NaCl	8	–12	11	19	30
С добавкой CaCl_2	8	–12	13	23	33
С добавкой NaNO_2	8	–12	9	20	30
С добавкой $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	8	–12	12	24	31
С добавкой CH_3COONa	8	–12	9	18	27
С добавкой $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	8	–12	11	18	29

Опасность применения подобных комплексов заключается в том, что пластифицирующие добавки при дозировке свыше 1,5 % от массы цемента способствуют замедлению гидратационных процессов. Напротив, электролиты и другие противоморозные компоненты применяются при значительно больших количествах.

Несоответствие этих двух составляющих при изменении технологических и температурных условий может привести к негативным последствиям. Об этом сообщалось ранее [3, 7, 11]. Производители химических добавок, стараясь получить универсальные смеси, стремятся в одной смеси совместить пластифицирующий и противоморозный компоненты, в результате чего получаются добавки, которые в большинстве своем могут быть использованы только в технологии «теплого» зимнего бетона. Немаловажное значение имеет тот факт, что ПАВ оказывают сильное влияние на морфологию зародышей кристаллизации и формирующиеся кристаллы. В результате адсорбции тормозится рост кристаллов, структура цементного камня становится более дисперсной и плохо закристаллизованной [1–3]. В целях повышения эффективности применения противоморозных добавок, особенно в технологии «холодных» бетонов, требуется раздельное введение в бетонные смеси пластифицирующего и противоморозного компонентов. Дозировка последнего должна назначаться в зависи-

мости от значений отрицательных температур, водоцементного отношения, состава вяжущего, характера влияния на процессы раннего структурообразования и твердения.

До начала массового применения противоморозных добавок в технологии зимнего бетона необходимо проводить всесторонние тестирования каждого из компонентов на составах растворов и бетонов с использованием базовых цементов. Это позволит не только повысить эффективность применения добавок, но и предотвратить многие негативные явления. Использование универсальных противоморозных добавок в количестве 4–6 % от массы цемента при температурах твердения «холодного» бетона до минус 20–25°C с позиций основных законов химии является малоэффективным. При определенных условиях, комбинируя ПАВ и электролиты и изменяя их дозировки в зависимости от назначения, условий твердения состава вяжущего и бетона, можно успешно их использовать опять-таки в технологии «теплого» бетона.

Важным фактором в технологии бетонов нового поколения, в том числе и для зимнего бетонирования, является разработка составов бетонов с использованием совместно с СП и ГП тонкодисперсных минеральных добавок, получаемых помолом плотных и прочных горных пород [12–19]. Подобные бетоны за счет рационально подобранного гранулометрического состава обладают повышенными показателями плотности, прочности, водонепроницаемости и морозо- и солестойкости. Эффективными компонентами в подобных бетонах могут стать не только противоморозные добавки, но также добавки – центры кристаллизации – синтезированные гидросиликаты кальция. Например, в ранние сроки твердения бетона с добавками ГСК можно получить высокие показатели прочности уже через 1–3 сут, что способствует резкому ускорению набора бетоном критической прочности, а противоморозные компоненты в короткие сроки твердения могут играть очень важную роль.

Таким образом, проведенный анализ основных механизмов действия компонентов комплексных противоморозных добавок в бетон и выполненные исследования позволили разработать принципы проектирования противоморозных смесей с учетом характера влияния компонентов на процессы структурообразования и твердения цементных бетонов при отрицательных температурах.

Список литературы

1. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с.
2. Рамачадран, В.С. Добавки в бетон: справ. пособие / В.С. Рамачадран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепарди [и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
3. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: Пенз. гос. ун-т архитектуры и стр-ва, 2004. – 564 с.
4. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
5. Миронов, С.А. Бетоны, твердеющие на морозе / С.А. Миронов, А.В. Лагойда. – М.: Стройиздат, 1974. – 265 с.
6. Добролюбов, Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. Добролюбов, В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1983. – 213 с.
7. Тараканов, О.В. Цементные материалы с ускоряющими и противоморозными добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: Пенз. гос. ун-т архитектуры и стр-ва, 2003. – 421 с.
8. Несветаев, Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах / Г.В. Несветаев // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С. 23–25.
9. Самойлов, О.Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов: дис. ... д-ра хим. наук / О.Я. Самойлов. – М., 1956. – 264 с.
10. Тараканов, О.В. Влияние комплексных минеральных добавок на прочность и состав гидратации цементных материалов / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №4 (45). – С. 46–52.

11. Тараканов, О.В. Повышение эффективности действия противоморозных добавок в технологии бетона / Т.К. Акчурин, И.В. Ерофеева, Е.А. Белякова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 4(89). – С. 114–129.
12. Bornemann, R. Ultrahochfester Beton–Entwicklung und Verhalten / R. Bornemann, E. Fenling // Leipziger Massivbauseminar. – 2000. – Bd. 10. – P. 1–15.
13. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // Proc. 14, Jbausil. – 2000. – Bd. 1. – P. 1083–1091.
14. Grube, P. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton / P. Grube, C. Lemmer, M. Rühl. – P. 243–249.
15. Kleingelhöfer, P. Neue Betoverflüssiger auf Basis Policarboxilat / P. Kleingelhöfer // Proc. 13. Jbasil Weimar. – 1997. – Bd. 1. – P. 491–495.
16. Калашников, В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... в форме научного доклада д.т.н. / В.И. Калашников. – Воронеж, 1996. – 89 с.
17. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70.
18. Калашников, В.И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – №12 (988). – С. 48–52.
19. Тараканов, О.В. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 3(88). – С. 97–107.
20. Тараканов, О.В. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1 (86). – С. 163–174.

References

1. Ratinov, V.B., Additives in concrete / V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg. – M.: Stroyizdat, 1989. – 187 p.
2. Ramachadran, V.S., Additives in concrete: reference manual / V.S. Ramachadran, R.F. Feldman, M. Kollepardi [etc.]. – M.: Stroyizdat, 1988. – 575 p.
3. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: Penza State University of Architecture and Architecture, 2004. – 564 p.
4. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting / S.A. Mironov. – M.: Stroyizdat, 1975. – 700 p.
5. Mironov, S.A. Concrete hardening in the cold / S.A. Mironov, A.V. Lagoida. – M.: Stroyizdat, 1974. – 265 p.
6. Dobrolyubov, G. Forecasting the durability of concrete with additives / G. Dobrolyubov, V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg. – M.: Stroyizdat, 1983. – 213 p.
7. Tarakanov, O.V. Cement materials with accelerating and antifreeze additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2003. – 421 p.
8. Nesvetaev, G.V. The effectiveness of the use of superplasticizers in concrete / G.V. Nesvetaev // Building materials. – 2006. – No. 10. – P. 23–25.
9. Samoilov, O.Ya. Structure of aqueous solutions of electrolytes and hydration of ions: Dissertation of Doctor of Chemical Sciences / O.Ya. Samoilov. – M., 1956. – 264 p.

10. Tarakanov, O.V. The influence of complex mineral additives on the strength and hydration composition of cement materials / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – №4 (45). – P. 46–52.
11. Tarakanov, O.V. Improving the effectiveness of antifreeze additives in concrete technology / T.K. Akchurin, I.V. Erofeeva, E.A. Belyakova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. – 2022. – Issue 4(89). – P. 114–129.
12. Bornemann, R. Ultrahochfester Beton–Entwicklung und Verhalten / R. Bornemann, E. Fenling // *Leipziger Massivbauseminar*. – 2000. – Bd. 10. – P. 1–15.
13. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // *Proc. 14, Jbausil*. – 2000. – Bd. 1. – P. 1083–1091.
14. Grube, P. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton / P. Grube, C. Lemmer, M. Rühl. – P. 243–249.
15. Kleingelhöfer, P. Neue Betoverflüssiger auf Basis Polycarboxilat / P. Kleingelhöfer // *Proc. 13. Jbasil Weimar*. – 1997. – Bd. 1. – P. 491–495.
16. Kalashnikov, V.I. Fundamentals of plasticization of mineral dispersed systems for the production of building materials: dissertation in the form of a scientific report for the degree of Doctor of Technical Sciences / V.I. Kalashnikov. – Voronezh, 1996. – 89 p.
17. Kalashnikov, V.I. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Tarakanov, D.V. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev // *Building Materials*. – 2014. – No. 9. – P.70.
18. Kalashnikov, V.I. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // *BST: Bulletin of construction equipment*. – 2016. – №12 (988). – P. 48–52.
19. Tarakanov, O.V. Expansion of the base of complex organomineral additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. – 2022. – Issue 3(88). – P. 97–107.
20. Tarakanov, O.V. Application of modified new generation concrete in construction / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2022. – № 1 (86). – P. 163–174.

УДК 553.635

DOI 10.54734/20722958_2023_3_103

Кубанский государственный
технологический университет

Россия, г.Краснодар, ул. Московская, д.2

Удодов Сергей Алексеевич,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Производство строительных конструкций
и строительная механика», проректор
по научной работе и инновациям
E-mail: udodov-tec@mail.ru

Маштаков Александр Филиппович,
кандидат химических наук, лаборант-
исследователь кафедры «Производство
строительных конструкций и строительная
механика»

Шиян Денис Викторович,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Производство строительных
конструкций и строительная механика»
E-mail: shiyandv80@mail.ru

Самандасюк Глеб Витальевич,
инженер кафедры «Производство
строительных конструкций и строительная
механика»
E-mail: gleb6730@gmail.com

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда
и ООО «ЕвроХим-БМУ» (г. Белореченск) в рамках научно-инновационного проекта
N МФИ-П-7/22 «Разработка технологии получения гипсового вяжущего из побочных
продуктов производственного цикла предприятия (фосфогипса)»

Kuban State Technological University

Russia, Krasnodar, 2, Moskovskaya St.

Udodov Sergey Alekseevich,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Production of building
structures and construction mechanics»,
Vice-Rector for Research and Innovation,
E-mail: udodov-tec@mail.ru

Mashtakov Aleksandr Fillipovich,
Candidate in Chemistry, Assistant lecturer
of the Department «Production of building
structures and construction mechanics»
E-mail: shiyandv80@mail.ru

Shiyan Denis Viktorovich,
Candidate in Economics, Senior lecturer
of the Department «Production of building
structures and construction mechanics»
E-mail: shiyandv80@mail.ru

Samandasyuk Gleb Vitalevich,
Assistant lecturer of the Department
«Production of building structures and
construction mechanics»
E-mail: gleb6730@gmail.com

Penza State University of Architecture
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the department
«Mathematics and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОБОЧНОГО ФОСФОГИПСА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

С.А. Удодов, А.Ф. Маштаков, Д.В. Шиян, Г.В. Самандасюк, А.М. Данилов

При производстве фосфорных минеральных удобрений в качестве побочного продукта образуется большое количество так называемого фосфогипса. Существует множество исследований, направленных на изучение возможности использования фосфогипса в различных отраслях, – сельском хозяйстве, дорожном строительстве, производстве строительных материалов, химической технологии др. Несмотря на это основным способом утилизации его на текущий момент является хранение в отвалах открытого типа, что неперспективно ни с экологической, ни с хозяйственной точки зрения. Например, только в результате деятельности ООО «ЕвроХим-БМУ» (г. Белореченск) в отвалах открытого типа накоплено более 50 млн т фосфогипса. При этом данный побочный продукт является источником полезных минеральных компонентов, в

том числе для производства строительного материала – гипсового вяжущего. В отвалах открытого типа в течение длительного времени фосфогипс испытывает весь спектр атмосферных воздействий. Результаты исследований показали, что неравные условия и длительность хранения оказывают незначительное влияние на элементный, оксидный состав фосфогипса, хотя и приводят к снижению примесей при более длительном открытом хранении.

Ключевые слова: побочный продукт, фосфогипс, элементный и оксидный состав, температура дегидратации, активность естественных радионуклидов

The research was carried out with the financial support of the Kuban Scientific Foundation and EuroChem-BMU LLC (Belorechensk) within the framework of the scientific and innovative project No. IFI-P-7/22 "Development of technology for obtaining gypsum binder from by-products of the production cycle of the enterprise (phosphogypsum)"

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF BY-PRODUCT PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR OBTAINING A GYPSUM BINDING

S.A. Udodov, A.F. Mashtakov, D.V. Shiyan, G.V. Samandayuk, A.M. Danilov

In the production of phosphoric mineral fertilizers a large amount of so-called phosphogypsum is formed as a by-product. There are many studies aimed at the research of the use of phosphogypsum in various industries – agriculture, road construction, production of building materials, chemical technology, etc. Despite this, the main method of its disposal at the moment is storage in open-type dumps, which is not promising from an environmental and economic point of view. For example, only as a result of the activities of EuroChem-BMU LLC (Belorechensk), more than 50 million tons of phosphogypsum have been accumulated in open-type dumps. At the same time, this by-product is a source of useful mineral components, including the production of construction material – gypsum binder. In open-type dumps, phosphogypsum has been experiencing a full range of atmospheric influences. Research results have shown that unequal conditions and time of storage don't greatly influence element and oxide composition of phosphogypsum, though lead to the reduction of impurities of long-term storage.

Keywords: By-product, phosphogypsum, elemental and oxide composition, dehydration temperature, activity of natural radionuclides



Рис.1. Вид мест хранения (отвалов) фосфогипса (снимок со спутника, меткой указано одно из мест отбора проб)

ООО «ЕвроХим – Белореченские минудобрения» – крупнейший промышленный объект юга России и градообразующее предприятие города Белореченска. «ЕвроХим» – вертикально интегрированная компания с широкой сферой деятельности: от добычи полезных ископаемых и углеводородов до производства, логистики и дистрибуции удобрений. Продукция компании поставляется более чем в сто стран мира.

Одним из побочных продуктов технологического цикла производства минеральных удобрений является фосфогипс. В настоящее время объем отвалов фосфогипса составляет около 50 млн т (рис. 1).

На сегодняшний день существует ряд разработок по получению из фосфогипса воздушного вяжущего вещества, пригодного для изготовления строительных материалов и смесей. Не вызывает сомнений целесообразность использования системного подхода в этих разработках [1, 2]. Часть разработок нацелены на использование фосфогипса без предварительного обжига [3], другие авторы решают проблему его применения

в форме ангидритового вяжущего [4]. Наиболее перспективно, на наш взгляд, получение из фосфогипса полуводного строительного гипса [5...7], иногда с отделением редкоземельных металлов [8...10]. Учитывая, что годовой объем производства строительного гипса из горных пород в России не превышает 4 млн т, одних только запасов фосфогипса белореченского ООО «ЕвроХим-БМУ» достаточно, чтобы покрыть потребность рынка в гипсовом вяжущем на годы вперед.

Наличие в фосфогипсе примесей не является препятствием для его применения в жилищном строительстве. Многочисленные исследования подтверждают соответствие материала нормам по предельно допустимым концентрациям вредных веществ, в том числе и по содержанию радиоактивных веществ [11]. Результаты испытаний фосфогипса по определению эффективной удельной активности радионуклидов $A_{эфф}$ подтверждают безопасность подобных материалов для использования в строительстве. При предельной допустимой величине $A_{эфф} = 370$ Бк/кг фактические значения этого показателя на технологических площадках России лежат в диапазоне 37–133 Бк/кг [12].

Результаты исследований фосфогипса ООО «ЕвроХим – Белореченские минудобренения» по показателю эффективной удельной активности радионуклидов приведены в табл. 1. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 30108-94 на образцах свежеполученного побочного продукта (нФГ) и находящегося в отвалах несколько лет и более (сФГ).

Т а б л и ц а 1

Результаты исследований фосфогипса ООО «ЕвроХим – Белореченские минудобренения» по показателю эффективной удельной активности радионуклидов

Тип фосфогипса	Наименование показателей в пробе	Допустимые уровни по НД (Бк/кг)	Допустимые уровни по НД (Бк/кг)	Абсолютная погрешность	НД на методы испытаний
1	2	3	4	5	6
нФГ	Калий-40 Торий-232 Радий-226 (U-238) УЭА ЕРН	 370	Менее 40 20,59 65,70 92,5	47,4 6,92 11,5 15,2	Методика измерения активности радионуклидов на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс»
сФГ	Калий-40 Торий-232 Радий-226 (U-238) УЭА ЕРН	 370	Менее 40 Менее 8 24,46 34,1	35,4 4,33 5,93 8,8	

Полученные данные согласуются с имеющимися в технической литературе сведениями и однозначно свидетельствуют о безопасности применения фосфогипса в строительстве с точки зрения уровня активности естественных радионуклидов. В исследуемых образцах показатель $A_{эфф}$ в 4–10 раз ниже допустимого. При этом следует отметить более высокую активность свежеполученного фосфогипса (нФГ) по сравнению с тем, который отобран с мест открытого хранения. Кроме того, $A_{эфф}$ данного сырья в процессе технологических переделов по получению из него гипсового вяжущего с большой долей вероятности снизится дополнительно, ввиду чего имеет смысл говорить о $A_{эфф}$ не сырья, а конечного продукта.

Побочный фосфогипс, размещенный и хранящийся в отвалах, имеет разный возраст, который может варьироваться от нескольких дней до нескольких десятков лет. В процессе хранения под открытым небом материал воспринимает атмосферные воздействия: осадки, отрицательные температуры, прямое воздействие солнечных лучей. При этом может изменяться влажность материала, значение рН, содержание

примесей. Приведенные выше данные о показателе $A_{\text{эфф}}$ сырья подтверждают это. Вместе с тем необходимо установить, насколько критичны различия в свойствах сырья разного возраста с точки зрения обеспечения стабильности качества итогового гипсового вяжущего.

Для определения разности в свойствах свежеполученного побочного продукта и находящегося в отвалах несколько лет и более были проведены исследования двух типов проб – нФГ и сФГ. Образцы ФГ были исследованы рентгенофлуоресцентным, рентгенофазовым и термическим методами анализа. Условия проведения съемки рентгенофлуоресцентного анализа – прибор Shimadzu EDX-800HS (Япония), материал анода рентгеновской трубки – родий, время экспозиции – 500 с, диаметр облучаемой зоны – 10 мм, атмосфера – вакуум.

Полученные энергетические спектры образцов приведены на рис. 2 и 3.

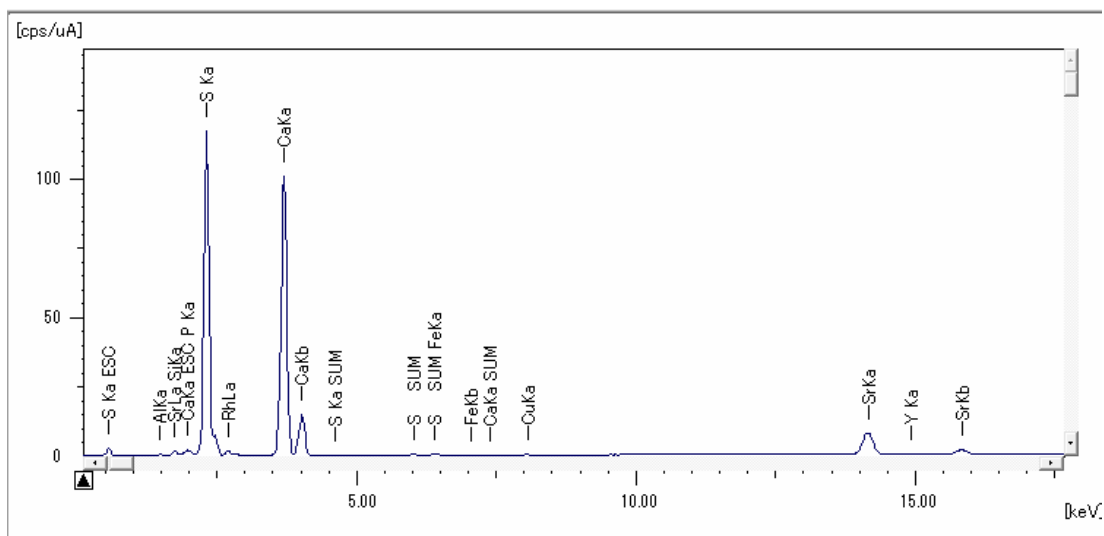


Рис. 2. Энергетический спектр образца нФГ

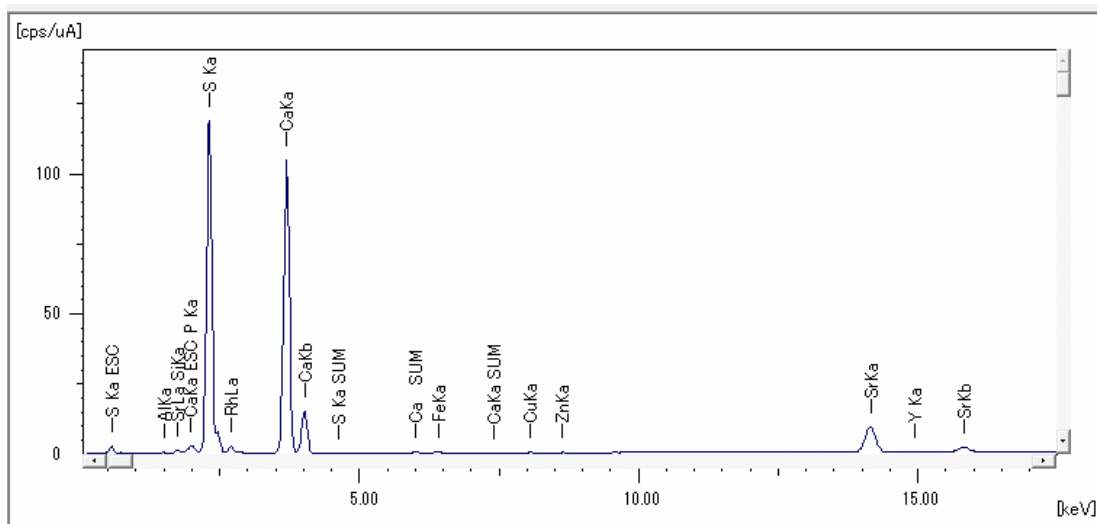


Рис. 3. Энергетический спектр образца сФГ

Сравнение двух графиков показывает практически полное сходство как по качественному элементному составу, так и по интенсивности пиков.

Оксидные составы образцов приведены в табл. 2.

Оксидный состав образцов нФГ и сФГ, приведенный к дегидратированному остатку

Формула оксида	Содержание, %	
	нФГ pH=4-5	сФГ pH=7-9
SO ₃	0,5512	0,5485
CaO	0,4230	0,4340
SiO ₂	0,0124	0,0096
P ₂ O ₅	0,0079	0,0017
Al ₂ O ₃	0,0028	0,0027
SrO	0,0023	0,0028
Fe ₂ O ₃	0,0002	0,0006
CuO	0,0001	0,0001
Y ₂ O ₃	0,0001	0,0000

Из табл. 2 следует, что содержание сульфата кальция в образцах (представлен оксидами CaO и SO₃) практически одинаково. Обе пробы отличаются значением pH, что обусловлено местом отбора: образец нФГ отбирался до нейтрализации известью, тогда как второй – из открытого отвала. Закономерна также разница в содержании примесей оксида фосфора – в образце из отвала его меньше примерно в 4 раза.

Условия проведения съемки термического анализа – прибор STA-409 PC Luxx фирмы Netzsch, диапазон температур 30–1000°C. Испытания проводились в атмосфере воздуха в платиновых тиглях при скорости нагрева 10°C/мин. Термограмма исследуемых образцов представлены на рис. 4 и 5.

Приведенные термограммы также подтверждают практически полную идентичность образцов по составу. С технологической точки зрения важно, что температуры перехода дигидрата сульфата кальция в полугидрат близки: 160,4 °C (нФГ) и 154,7 °C (сФГ).

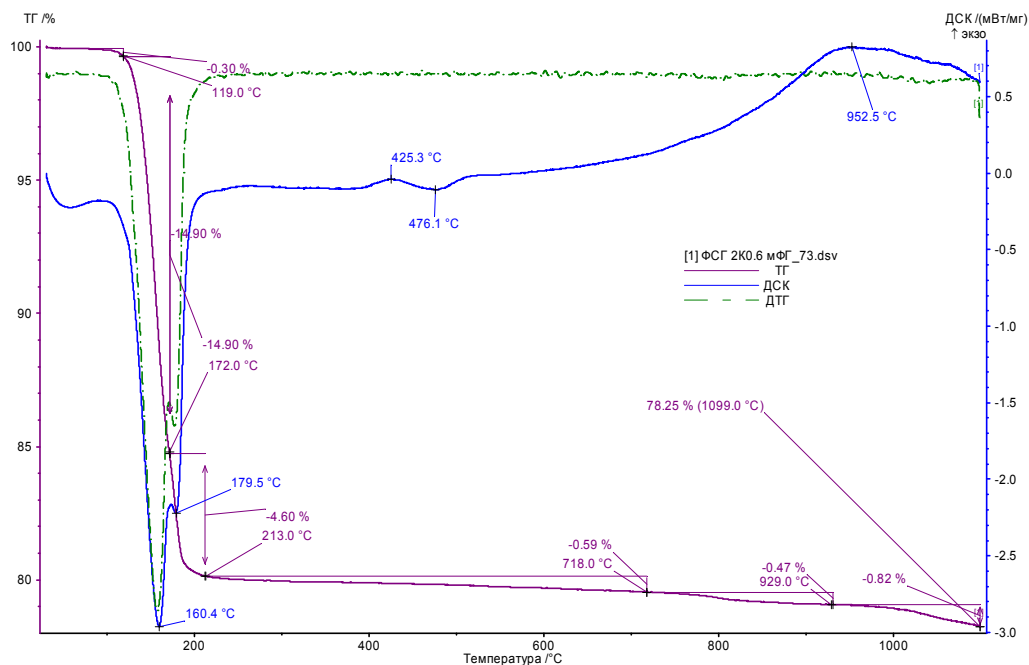


Рис. 4. Термограмма образца нФГ

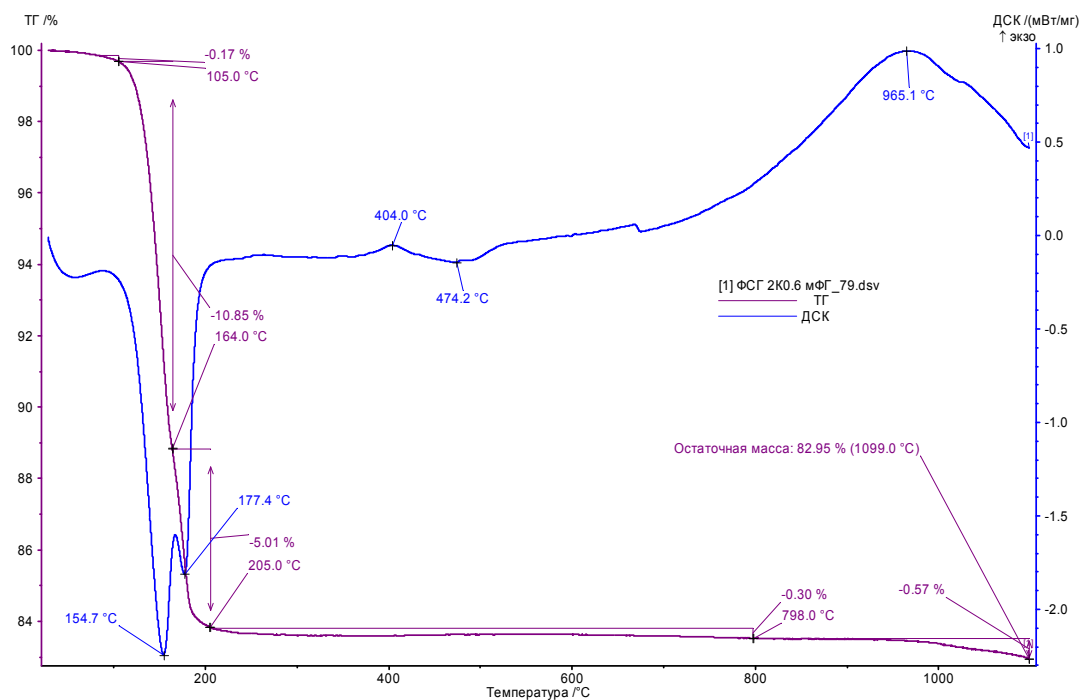


Рис. 5. Термограмма образца сФГ

Полученные результаты сравнительного анализа свежего (до нейтрализации) фосфогипса и материала из отвалов возрастом не менее нескольких лет свидетельствуют о незначительной разнице в их элементном и оксидном составе. Несмотря на то, что нФГ имеет несколько более низкую температуру перехода полугидрата в ангидрит, в нашем случае это незначительно, поскольку исследование ориентировано на получение полуводного гипса. Близкая температура перехода в полугидрат из двуводного потенциально обеспечивает стабильность стадии термической обработки фосфогипса и относительную независимость результата от места отбора сырья.

Список литературы

1. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 48–53.
2. Selyaev, V. Systems approach to analysis of destruction of cement composites / V. Selyaev, P. Selyaev, I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 960(2). – P. 022009.
3. Золотухин, С.Н. Эффективные безобжиговые строительные материалы на основе фосфогипса / С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, А.А. Абраменко // Современное строительство и архитектура. – 2017. – № 4 (08). – С. 8–14.
4. Сагындыков, А.А. Ангидритовые вяжущие из фосфогипса и доломита / А.А. Сагындыков, Б.А. Нурлыбаев, Н.Т. Карабаев, А.К. Медетов // Механика и технологии. – 2022. – №1(75). – С. 71–77.
5. Гончаров, В.М. Проблемы и пути утилизации фосфогипса с разработкой эффективных технологий и новых стройматериалов с соответствующими потребительскими характеристиками / В.М. Гончаров, С.В. Скориков // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2014. – №7–1. – С. 50–52.
6. Локшин, Э.П. О комплексной переработке фосфогипса / Э.П. Локшин, О.А. Тареева, И.Р. Елизарова // Журнал прикладной химии. – 2013. – Т. 86, Вып. 4. – С. 497–502.

7. Касимов, А.М. Новая технология утилизации фосфогипса для производства гипсовых вяжущих и изделий для строительной индустрии / А.М. Касимов, Е.Е. Решта // Экология и промышленность. – 2011. – №3(28). – С. 90–93.
8. Пат. 2689631 Российская Федерация, МПК C01F17/00 C22B59/00 C22B3/00. Способ извлечения РЗЭ из фосфогипса / Галиева Ж.Н., Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Пироженов К.Ю., Кулагин Б.Р., Дронов Д.В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Инновационных Технологий». – №2016152708; заявл. 30.12.2016; опубл. 04.07.2018 Бюл. № 19.
9. Пат. 2706401 Российская Федерация, МПК C01F 11/46. Способ переработки отходов фосфогипса с получением концентрата редкоземельных элементов и гипса строительного / Кантюков Д.Т., Хаматшин Р.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НефтеХимКонсалт». – № 2019113974; заявл. 06.05.2019; опубл. 18.11.2019 Бюл. № 32.
10. Пат. 2708718 Российская Федерация, МПК C22B 59/00 C22B 3/08. Способ переработки отходов фосфогипса с получением концентрата РЗЭ и гипса строительного / Будник В.А., Бобровский Р.И., Кондратьев А.С., Смаков М.Р.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ХАММЕЛЬ». – № 2019118368; заявл. 13.06.2019; опубл. 11.12.2019 Бюл. № 35.
11. Пат. 107524 Российская Федерация, МПК C05B 11/00. Устройство для перевода фосфогипса IV класса опасности в продукт V Класса / Володин П.Н., Сидоренкова Н.Г., Сергеев В.П., Болтников Ф.М.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество (ОАО) «Мелеузовские минеральные удобрения». – № 2011112538/13; заявл. 01.04.2011; опубл. 20.08.2011
12. Урусов, Д.А. Анализ структурных и санитарно-гигиенических показателей строительных изделий из прессованного фосфогипса / Д.А. Урусов // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корр. РААСН, д.т.н., проф. В.С. Лесовика: в 3 частях. Часть 3. – 2016. – С. 167–172.

References

1. Budylna, E.A. System research in materials science / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 4 (49). – P. 48–53.
2. Selyaev, V. Systems approach to analysis of destruction of cement composites / V. Selyaev, P. Selyaev, I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 960(2). – P. 022009.
3. Zolotukhin, S.N. Effective non-firing building materials based on phosphogypsum / S.N. Zolotukhin, O.B. Kukina, A.A. Abramenko // Modern construction and architecture. – 2017. – No. 4 (08). – P. 8–14.
4. Sagyndykov, A.A. Anhydrite binders from phosphogypsum and dolomite / A.A. Sagyndykov, B.A. Nurlybaev, N.T. Karabaev, A.K. Medetov // Mechanics and Technologies. – 2022. – No. 1(75). – P. 71–77.
5. Goncharov, V.M. Problems and ways of utilization of phosphogypsum with the development of efficient technologies and new building materials with appropriate consumer characteristics / V.M. Goncharov, S.V. Skorikov // Eurasian Union of Scientists (ESU). – 2014. – №7–1. – P. 50–52.
6. Lokshin, E.P. On the complex processing of phosphogypsum / E.P. Lokshin, O.A. Tareeva, I.R. Elizarova // Journal of Applied Chemistry. – 2013. – Vol. 86, Issue. 4. – P. 497–502.
7. Kasimov, A.M. New technology for the utilization of phosphogypsum for the production of gypsum binders and products for the construction industry / A.M. Kasimov, E.E. Reshta // Ecology and Industry. – 2011. – №3(28). – P. 90–93.
8. Pat. 2689631 Russian Federation, IPC C01F17/00 C22B59/00 C22B3/00. Method for extracting RZE from phosphogypsum / Galiyeva Zh.N., Abramov A.M., Sobol Yu.B.,

Pirozhenko K.Yu., Kulagin B. R., Dronov D.V.; applicant and patent holder Limited Liability Company «Laboratory of Innovative Technologies». – No. 2016152708; dec. 12/30/2016; publ. 07/04/2018 Bull. No. 19.

9. Pat. 2706401 Russian Federation, IPC C01F 11/46. Method for processing phosphogypsum waste to obtain a concentrate of rare earth elements and building gypsum / Kantyukov D.T., Khamatshin R.A.; applicant and patent owner Limited Liability Company «NefteKhimKon-salt». – No. 2019113974; dec. 05/06/2019; publ. 11/18/2019 Bull. No. 32.

10. Pat. 2708718 Russian Federation, IPC C22B 59/00 C22B 3/08. Method for processing phosphogypsum waste to produce REE concentrate and building gypsum / Budnik V.A., Bobrovsky R.I., Kondratve A.S., Smakov M.R.; applicant and patent holder Limited Liability Company «HAMMEL». – No. 2019118368; dec. 06/13/2019; publ. 12/11/2019 Bull. No. 35.

11. Pat. 107524 Russian Federation, IPC C05B 11/00. Device for converting phosphogypsum of hazard class IV into a product of Class V / Volodin P.N., Sidorenkova N.G., Sergeev V.P., Boltnikov F.M.; applicant and patent holder Open Joint Stock Company (JSC) «Meleuz Mineral Fertilizers». – No. 2011112538/13; dec. 04/01/2011; publ. 20.08.2011

12. Urusov, D.A. Analysis of structural and sanitary-hygienic indicators of building products from pressed phosphogypsum / D.A. Urusov // Intelligent building composites for green building. Collection of reports of the international scientific-practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Stanislavovich Lesovik: In 3 parts. Part 3. – 2016. – P. 167–172.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.059.4

DOI 10.54734/20722958_2023_3_111

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

Селяев Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные конструкции»,
академик РААСН
E-mail: ntorm80@mail.ru

Безрукова Евгения Сергеевна,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Бабушкина Дельмира Рификовна,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Грязнов Сергей Юрьевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

Selyaev Vladimir Pavlovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Building Structures»,
Academician of the Russian Academy of
Architectural and Construction Sciences
E-mail: ntorm80@mail.ru

Bezrukova Evgenia Sergeevna,
Postgraduate student of the Department
«Building Structures»
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Babushkina Delmira Rifikovna,
Postgraduate student of the Department
«Building Structures»
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Gryaznov Sergey Yurievich,
Postgraduate student of the Department
«Building Structures»
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ДЕГРАДАЦИИ

В.П. Селяев, Е.С. Безрукова, Д.Р. Бабушкина, С.Ю. Грязнов

Рассматривается методика прогнозирования долговечности железобетонного изгибаемого элемента по прочности наклонных сечений, основанная на анализе изменения величины индекса надежности при совместном действии силовых факторов и агрессивной среды. Рассмотрен случай действия равномерно распределенной нагрузки агрессивной среды в приопорной зоне балки. Приведены результаты расчета наклонных сечений по трем классическим условиям прочности. Показана возможность применения функций деградации и метода статистической линеаризации для прогнозирования долговечности железобетонных конструкций.

Ключевые слова: вероятностная оценка долговечности, воздействие агрессивной среды, деградационная функция, расчет по наклонным сечениям, индекс надежности

ESTIMATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DURABILITY ON THE STRENGTH OF INCLINED SECTIONS BY THE METHOD OF STATISTICAL LINEARIZATION OF DEGRADATION FUNCTIONS

V.P. Selyaev, E.S. Bezrukova, D.R. Babushkina, S.Yu. Gryaznov

The article discusses a method for predicting the durability of a reinforced concrete bending element by the strength of inclined sections, based on the analysis of the change in the value of the reliability index under the combined action of force factors and an aggressive environment. A case of the action of a uniformly distributed load of an aggressive medium in the support zone of a beam is considered. The results of calculation of inclined sections according to three classical strength conditions are presented. The possibility of using degradation functions and the method of statistical linearization for predicting the durability of reinforced concrete structures is shown.

Keywords: probabilistic assessment of durability, impact of an aggressive environment, degradation function, calculation for inclined sections, reliability index

Задача оценки долговечности и прогнозирования ресурса железобетонных конструкций долгие годы не теряет своей актуальности. Ее значение обосновывается в работах А.Н. Алексеева, Ю.М. Баженова, Б.В. Гусева, А.П. Кудзиса, Л.М. Пухонто, А.Р. Ржаницына, В.П. Селяева, Н.С. Стрелецкого, В.П. Чиркова и др. [1–17].

Расчетные модели прочности по наклонным сечениям железобетонных конструкций, подверженных влиянию агрессивных сред, рассматривались в работах В.И. Бондаренко и В.И. Колчунова [18–20], а вероятностные методы прогнозирования долговечности железобетонных конструкций – в работах В.В. Болотина, А.Р. Ржаницына, В.П. Чиркова [1–2, 15, 21].

Вероятностная оценка долговечности железобетонных конструкций по наклонным сечениям, выполненная авторами данной статьи, основывается на предложении Л.М. Пухонто, В.П. Селяева, В.Н. Уткиной оценивать вероятность разрушения конструкции по характеристике безопасности (индексу надежности) [3, 10–12, 17]. Данный метод обладает относительной простотой и универсальностью, а кроме того, дает возможность включать в расчет данные об изменении свойств материала во времени, что позволяет ввести в расчет действие агрессивной среды, которое описывается деградационной функцией, учитывающей: геометрические параметры изгибаемого элемента, период действия агрессивной среды, коэффициент химического сопротивления, глубинный показатель проникновения агрессивной среды в конструкцию, коэффициент диффузии.

Целью данной работы является осуществление вероятностной оценки долговечности железобетонного изгибаемого элемента (балки) по наклонным сечениям методом статистической линейаризации деградационных функций на основе изменения индекса надежности во времени.

Влияние агрессивной среды на изменение надежности строительной конструкции будем определять методом деградационных функций. Формирование модели деградации поперечного сечения железобетонного изгибаемого элемента осуществляется на основе расчетной модели прочности наклонных сечений изгибаемых элементов, рекомендованной СП 63.13330.2018. Модель деградации в виде изохрон, характеризующих распределение свойств – предела прочности, модуля упругости – по высоте поперечного сечения конструкционного элемента представлена на рис. 1.

Рассмотрим железобетонный изгибаемый элемент, который эксплуатируется в среде, агрессивной по отношению к бетону. Принята однопролетная шарнирно опертая балка прямоугольного сечения ($b = 10$ см, $h = 25$ см, $l = 6$ м), выполненная из бетона класса В25, армированная 2Ø12 АIII ($A_s = 226 \text{ мм}^2$, $a = 2$ см, $h_0 = 22,4$ см). Приложена равномерно распределенная нагрузка по всей длине балки $q = 20$ кН/м. При эксплуатации в нормальных условиях несущая способность балки будет определяться прочностью нормального сечения в середине пролета. Однако под действием

агрессивной среды в приопорной зоне прочность бетона снижается, и после некоторого времени эксплуатации возможно разрушение по наклонному сечению.

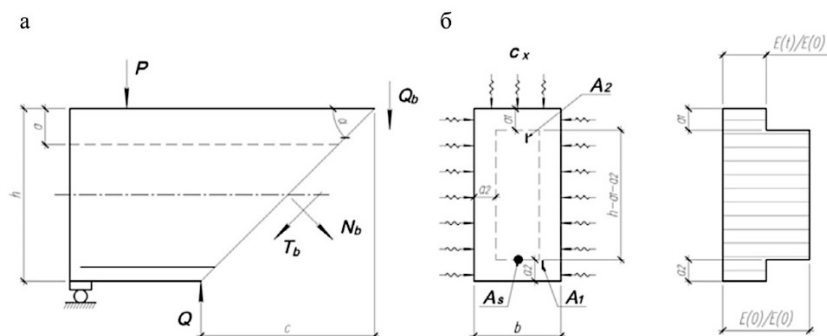


Рис. 1. Расчетная модель прочности наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию агрессивных сред:
а – силовая модель; б – модель деградации

Изменение коэффициента химического сопротивления $k_{х.с.}$ и глубинного показателя δ во времени принято исходя из экспериментальных данных экспонирования образцов из цементного мелкозернистого бетона (наполнение – 10 % ОПФ) в 2 % растворе H_2SO_4 (рис. 2, 3).

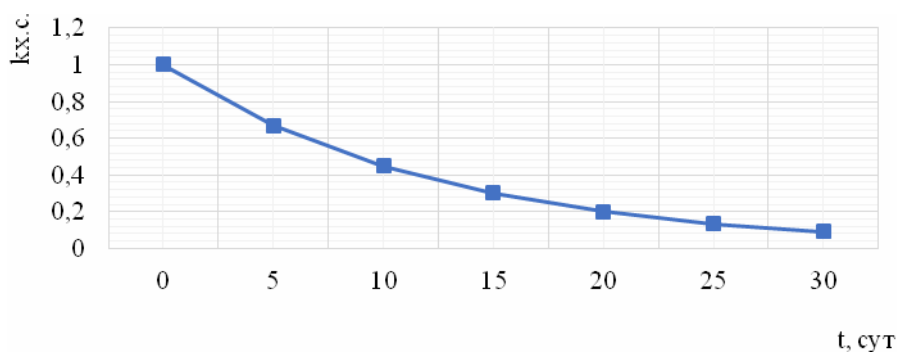


Рис. 2. Изменение коэффициента химического сопротивления при экспонировании образцов (наполнение – 10 % ОПФ) в 2 % растворе H_2SO_4

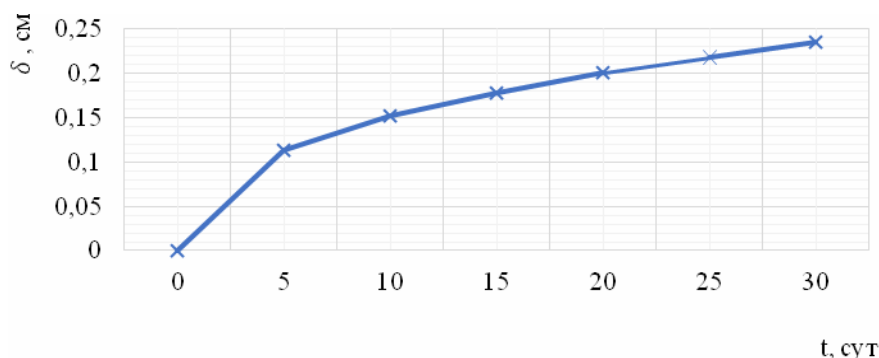


Рис. 3. Изменение глубинного показателя δ при экспонировании образцов (наполнение – 10 % ОПФ) в 2 % растворе H_2SO_4 , см

В классической теории расчета железобетонных конструкций предполагается, что разрушение бетона по наклонным сечениям происходит под действием растяги-

вающих напряжений (первое условие прочности $\sigma \leq R_{bt}$). С учетом расчетной модели, представленной на рис. 1, получим следующее выражение:

$$Q_{b1(t)} = \frac{N_b}{\cos \alpha} = \varphi \frac{R_{bt} b h^2}{c} \left[1 - \frac{A_1}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right], \quad (1)$$

где $\varphi = \left(1 + \frac{c^2}{h^2} \right)$; $A_1 = b(a_1 + a_2) + 2a_3 [h - (a_1 + a_2)]$.

При отсутствии повреждений бетона принимаем $A_1 = 0$, в результате чего получаем формулу М. С. Боришанского. Поскольку разрушение по наклонному сечению возможно под действием касательных усилий T_b , принимаем в качестве предельного условия второе условие прочности: $\tau \leq R_{bt}$. Получаем:

$$Q_{b2(t)} = \frac{T_b}{\sin \alpha} = \varphi R_{bt} b h \left[1 - \frac{A_1}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right]. \quad (2)$$

В качестве критерия разрушения может быть применено условие прочности Кулона – Навье $|\tau| + \mu \sigma \leq R_{bt}$. Получим:

$$Q_{b3(t)} = \varphi \frac{R_{bt} b h}{1 + \mu c / h} \left[1 - \frac{A_1}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right], \quad (3)$$

где μ – коэффициент трения.

Согласно данной формуле, изменение поперечной силы, воспринимаемое поперечным сечением, зависит от соотношения длины проекции наклонного сечения и высоты изгибаемого элемента c/h и коэффициента трения μ .

Математическое моделирование. Рассматривая влияние агрессивной среды на величину поперечной силы, воспринимаемой бетоном, запишем формулы (1)–(3) через кинетические характеристики взаимодействия бетона с агрессивной средой: глубинный показатель a и коэффициент химического сопротивления $k_{x.c.}$.

При условии $a = a_1 = a_2 = a_3$ получим:

$$Q_{b1(t)} = \varphi \frac{R_{bt} b h^2}{c} \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right]; \quad (4)$$

$$Q_{b2(t)} = \varphi R_{bt} b h \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right]; \quad (5)$$

$$Q_{b3(t)} = \varphi \frac{R_{bt} b h}{1 + \mu c / h} \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right]. \quad (6)$$

Принимая во внимание то, что $Q_{b1(t)} = Q_{b1(0)} D(Q)$; $Q_{b2(t)} = Q_{b2(0)} D(Q)$; $Q_{b3(t)} = Q_{b3(0)} D(Q)$, а также то, что $a = k(\xi) \sqrt{Dt}$ и $k_{x.c.} = \frac{1}{k_1 t + 1}$, можно записать аналитическое выражение изменения поперечной силы во времени с учетом наличия деградационной функции $D(Q)$ для каждого отдельного условия прочности. Деградационная функция при этом будет иметь следующий вид:

$$D(Q) = 1 - \frac{2k(\xi) \sqrt{Dt} (b+h)}{bh} \left(1 - \frac{1}{k_1 t + 1} \right) + \frac{4k^2(\xi) Dt}{bh} \left(1 - \frac{1}{k_1 t + 1} \right). \quad (7)$$

В формулах (4)–(6) случайными величинами являются: R_{bt} – предел прочности бетона осевому растяжению; a – глубинный показатель; $k_{x.c.}$ – коэффициент химического сопротивления; геометрические характеристики: h – высота поперечного сечения балки; b – ширина поперечного сечения балки; c – длина проекции наклонного сечения.

Определим частные производные для первого условия прочности:

$$B_1 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial R_{bt}}; \quad B_2 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial h}; \quad B_3 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial b}; \quad B_4 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial c}; \quad B_5 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial k_{x.c.}}; \quad B_6 = \frac{\partial Q_{b1(t)}}{\partial f},$$

где $B_1 = \varphi \frac{bh^2}{c} \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right];$

$$B_2 = \left\{ R_{bt} bh \varphi \left[\frac{2a(b+h)}{bh^2} (1 - k_{x.c.}) - \frac{4a^2}{bh^2} (1 - k_{x.c.}) - \frac{2a}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{-2bc^2 R_{bt}}{h} + 2bh R_{bt} \varphi \right] \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right] \right\} / c;$$

$$B_3 = \frac{R_{bt} bh^2}{c} \varphi \left[\frac{2a(b+h)}{b^2 h} (1 - k_{x.c.}) - \frac{2a}{bh} (1 - k_{x.c.}) - \frac{4a^2}{b^2 h} (1 - k_{x.c.}) \right] + \\ + \frac{R_{bt} h^2}{c} \varphi \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right];$$

$$B_4 = 2b R_{bt} \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right] - \\ - \frac{R_{bt} bh^2}{c^2} \varphi \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{x.c.}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right];$$

$$B_5 = \varphi \frac{bh^2 R_{bt}}{c} \left[\frac{2a(b+h)}{bh} - \frac{4a^2}{bh} \right];$$

$$B_6 = \varphi \frac{bh^2 R_{bt}}{c} \left[\frac{8a}{bh} (1 - k_{x.c.}) - \frac{2b+2h}{bh} (1 - k_{x.c.}) \right].$$

Приближенные значения центра (математическое ожидание) $\bar{Q}_{b1(t)}$ и дисперсии $S^2(Q_{b1(t)})$:

$$\bar{Q}_{b1(t)} = \bar{Q}_{b1(0)} D(t);$$

$$S^2(Q_{b1(t)}) = B_1^2 S^2(R_{bt}) + B_2^2 S^2(h) + B_3^2 S^2(b) + B_4^2 S^2(c) + B_5^2 S^2(k_{x.c.}) + B_6^2 S^2(a); \quad (9)$$

$$\bar{Q} = 0,5 \bar{q} \bar{l}; \quad S^2(Q) = B_7^2 S^2(Q).$$

Частные производные для второго условия прочности:

$$B_1 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial R_{bt}}; \quad B_2 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial h}; \quad B_3 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial b}; \quad B_4 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial c}; \quad B_5 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial k_{x.c.}}; \quad B_6 = \frac{\partial Q_{b2(t)}}{\partial f},$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } B_1 &= \varphi b h \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right]; \\
 B_2 &= b h R_{b\tau} \varphi \left(\frac{-2a}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{2a(b+h)}{bh^2} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{4a^2}{bh^2} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right) + \\
 &+ \left(b R_{b\tau} \varphi - \frac{2bc^2 R_{b\tau}}{h^2} \right) \left(1 - \frac{2a(b+h)}{bh^2} \right) (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}); \\
 B_3 &= b h R_{b\tau} \varphi \left(\frac{2a(b+h)}{b^2 h} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{2a}{bh} - \frac{4a^2}{b^2 h} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right) + \\
 &+ h R_{b\tau} \varphi \left(1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right); \\
 B_4 &= \frac{2bc R_{b\tau}}{h} \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right]; \\
 B_5 &= b h R_{b\tau} \varphi \left(\frac{2a(b+h)}{bh} - \frac{4a^2}{bh} \right); \\
 B_6 &= b h R_{b\tau} \varphi \left(\frac{8a}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{2b+2h}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right).
 \end{aligned}$$

Приближенные значения центра (математическое ожидание) $\bar{Q}_{b2(t)}$ и дисперсии $S^2(Q_{b2(t)})$:

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{b2(t)} &= \bar{Q}_{b2(0)} D(t); \\
 S^2(Q_{b2(t)}) &= B_1^2 S^2(R_{b\tau}) + B_2^2 S^2(h) + B_3^2 S^2(b) + B_4^2 S^2(c) + B_5^2 S^2(k_{\text{х.с.}}) + B_6^2 S^2(a); \quad (10) \\
 \bar{Q} &= 0,5 \bar{q} \bar{l}; \quad S^2(Q) = B_7^2 S^2(Q).
 \end{aligned}$$

Частные производные для условия прочности Кулона – Навье:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial R_{b\tau}}; B_2 = \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial h}; B_3 = \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial b}; B_4 = \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial c}; B_5 = \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial k_{\text{х.с.}}}; B_6 = \frac{\partial Q_{b3(t)}}{\partial a}, \\
 \text{где } B_1 &= \frac{\varphi b h \left[1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right]}{1 + \mu c / h}; \\
 B_2 &= \frac{bc^2 R_{b\tau} \varphi \left(1 - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right)}{h(1 + \mu c / h)^2} + \\
 &+ \frac{h b R_{b\tau} \varphi \left(\frac{2a(b+h)}{bh^2} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{4a^2}{bh^2} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{2a}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right)}{1 + \mu c / h} + \\
 &+ \frac{\left(-\frac{2bc^2 R_{b\tau}}{h^2} + b R_{b\tau} \varphi \right) \left(1 + \frac{4a^2}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) - \frac{2a(b+h)}{bh} (1 - k_{\text{х.с.}}) \right)}{1 + \mu c / h};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_3 &= \frac{bhR_{b\tau}\varphi\left(-\frac{4a^2}{b^2h}(1-k_{x.c.})+\frac{2a(b+h)}{b^2h}(1-k_{x.c.})-\frac{2a}{bh}(1-k_{x.c.})\right)}{1+\mu c/h}+ \\
&+ \frac{hR_{b\tau}\varphi\left(1+\frac{4a^2}{bh}(1-k_{x.c.})-\frac{2a(b+h)}{bh}(1-k_{x.c.})\right)}{1+\mu c/h}; \\
B_4 &= -\frac{bR_{b\tau}\varphi\mu\left(1+\frac{4a^2}{bh}(1-k_{x.c.})-\frac{2a(b+h)}{bh}(1-k_{x.c.})\right)}{\left(1+\frac{\mu c}{h}\right)^2}+ \\
&+ \frac{2bcR_{b\tau}\left(1+\frac{4a^2}{bh}(1-k_{x.c.})-\frac{2a(b+h)}{bh}(1-k_{x.c.})\right)}{h\left(1+\frac{\mu c}{h}\right)}; \\
B_5 &= \frac{bhR_{b\tau}\varphi\left(\frac{2a(b+h)}{bh}-\frac{4a^2}{bh}\right)}{1+\mu c/h}; \\
B_6 &= \frac{bhR_{b\tau}\varphi\left(\frac{8a(1-k_{x.c.})}{bh}-\frac{2b+2h}{bh}(1-k_{x.c.})\right)}{1+\mu c/h}.
\end{aligned}$$

Приближенные значения центра (математическое ожидание) $\bar{Q}_{b3(t)}$ и дисперсии $S^2(Q_{b3(t)})$:

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{b3(t)} &= \bar{Q}_{b3(0)}D(t); \\
S^2(Q_{b3(t)}) &= B_1^2S^2(R_{b\tau}) + B_2^2S^2(h) + B_3^2S^2(b) + B_4^2S^2(c) + B_5^2S^2(k_{x.c.}) + B_6^2S^2(a); \quad (11) \\
\bar{Q} &= 0,5\bar{q}l; \quad S^2(Q) = B_7^2S^2(Q),
\end{aligned}$$

где $B_7 = 0,5l$.

Тогда индекс надежности с учетом деградации бетона

$$\gamma = \frac{\bar{Q}_{b(t)} - \bar{Q}}{\sqrt{S^2(Q_{b(t)}) + S^2(Q)}}. \quad (12)$$

Результаты. Подставив полученные значения в формулу (12), найдем индекс надежности γ (табл. 3). Исходя из результатов табл. 3, можем построить график изменения во времени индекса γ (рис. 4–5). Исходные данные представлены в табл. 1–2.

Таблица 1

Исходные параметры для расчета (постоянные)

№ п/п	Параметры	R_{bt}	$R_{b\tau}$	c	h	b	l	q
1	Ед. изм.	МПа	МПа	см	см	см	см	кН/м
2	Среднее значение	1,6	3,2	48,8	24,4	10,89	600	23,92
3	Расчетное значение	1,05	2,1	40,8	20,4	9,95	580	22
4	Нормативное значение	1,55	3,1	44,8	22,4	10	600	20
5	Коэффициент вариации v_n	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	–	0,1

Исходные параметры для расчета (переменные)

№ п/п	Варьируемые параметры	Единица измерения	Среднее значение	Коэффициент вариации υ_n	Изменчивость параметров S_x	Время t , сут
1	δ	см	0	0,05	0	0
			0,11		0,0055	5
			0,15		0,0075	10
			0,17		0,0085	15
			0,20		0,0100	
			0,22			
			0,23		0,0115	30
2	$k_{x.c.}$	–	1	0,2	0,200	0
			0,67		0,134	5
			0,45		0,090	10
			0,30		0,060	15
			0,20		0,040	20
			0,14		0,028	25
			0,09		0,018	30

Дополнительно принято, что $C = 2h$. Также для расчета индекса надежности по условию прочности Кулона – Навье, приведенного в табл. 3, принят коэффициент трения, равный $\mu = 0,5$. Изменение индекса надежности в зависимости от изменения коэффициента трения будет рассмотрено дополнительно (рис. 5).

Таблица 3

Определение надежности конструкции

№ п/п	Параметры	$Q_{b(t)}$	Q	$S^2(Q_{b(t)})$	$S^2(Q)$	γ
1	Ед. изм.	кН	кН	кН ²	кН ²	
2	Среднее значение при t , сут (1-е условие прочности)					
	0	1062,864	71,77	1479,41	515098	1,379
	5	1051,099		1502,23		1,363
	10	1036,572		1486,89		1,342
	15	1023,957		1461,10		1,325
	20	1012,662		1436,03		1,309
	25	1004,298		1415,88		1,298
	30	996,098		1394,61		1,286
3	Среднее значение при t , сут (2-е условие прочности)					
	0	4251,4560	71,77	79069,104	515098	5,422
	5	4204,3946		77294,996		5,369
	10	4146,2875		75273,361		5,303
	15	4095,8297		73553,608		5,245
	20	4050,6486		72043,284		5,193
	25	4017,1919		70941,643		5,154
	30	3984,3929		69872,141		5,116
4	Среднее значение при t , сут (3-е условие прочности)					
	0	1417,152	71,77	18001,508	515098	2,775
	5	1401,465		17687,185		2,745
	10	1382,096		17288,688		2,707
	15	1365,277		16944,842		2,674
	20	1350,216		16640,996		2,645
	25	1339,064		16418,241		2,623
	30	1328,131		16201,344		2,602

Таким образом, индекс надежности железобетонной шарнирно опертой балки прямоугольного сечения по трем условиям прочности примет следующий вид (рис. 4). Из рисунка видно, что наибольший индекс надежности получен при расчете с учетом второго условия прочности, наименьший – с учетом первого условия прочности.

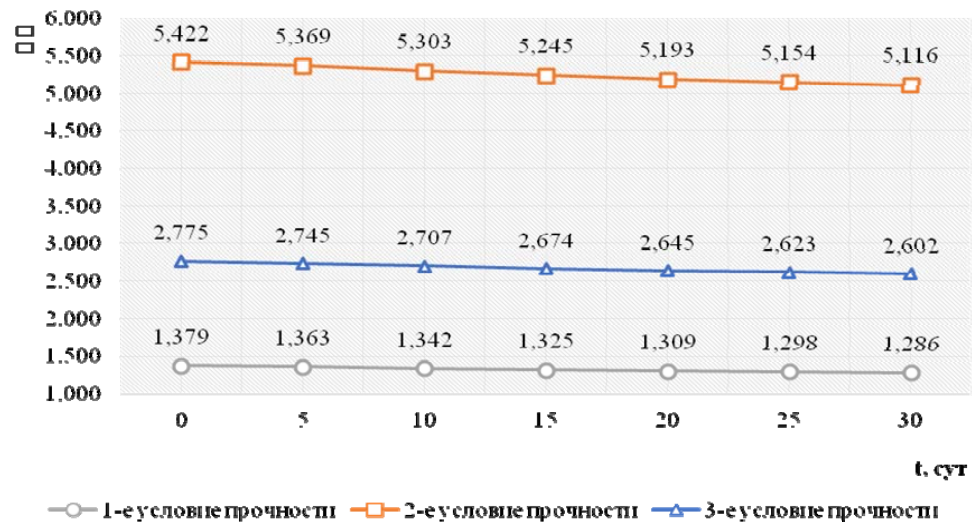


Рис. 4. Изменение индекса надежности γ во времени

На рис. 4 изображено изменение индекса надежности при расчете по условию прочности Кулона – Навье при значении коэффициента трения $\mu = 0,5$. Рассмотрим изменение индекса надежности при следующих значениях коэффициента трения: $\mu = 0; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0$ (рис. 5).

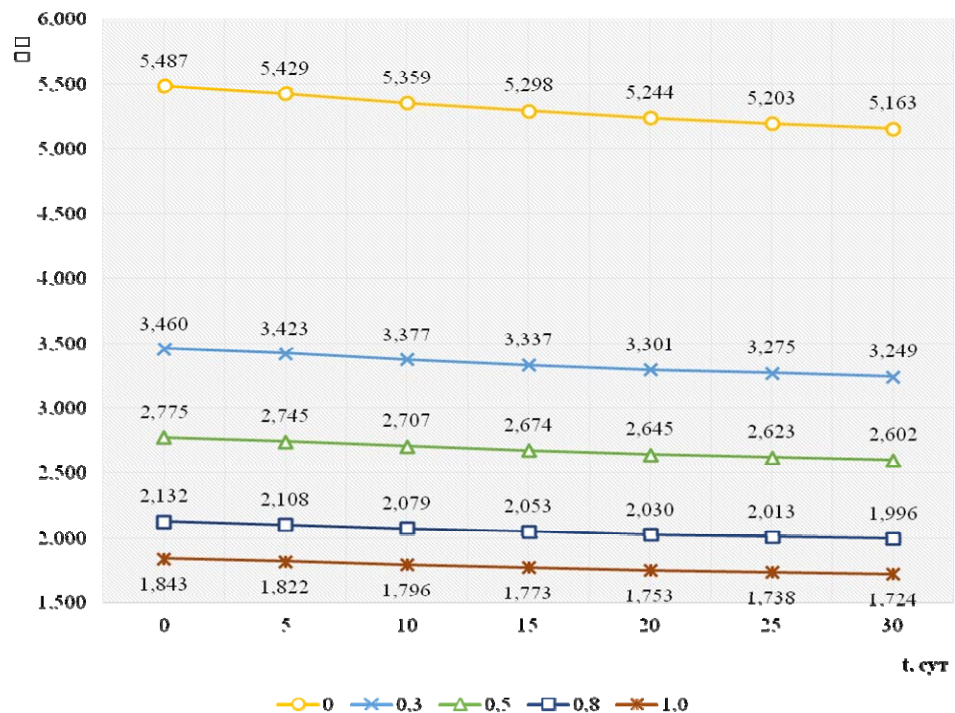


Рис. 5. Изменение индекса надежности γ во времени (условие прочности Кулона – Навье) при коэффициентах трения $\mu = 0; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0$

Исходя из полученных результатов, можно увидеть, что между значением коэффициента трения и индексом надежности существует обратная зависимость: увеличение коэффициента трения вызывает уменьшение индекса надежности.

Выводы. В статье предложена методика оценки надежности и долговечности строительных конструкций на примере железобетонной балки, которая основана на применении деградационных моделей и функций и позволяет прогнозировать конструкционное обеспечение ресурсов элементов. Получены адекватные значения индексов надежности для каждого из трех рассматриваемых условий прочности.

Используемая методика применима как на начальных этапах жизни железобетонной конструкции, так и на всем протяжении ее эксплуатации в условиях влияния агрессивной среды.

Список литературы

1. Ржаницын, А.Р. Определение запаса прочности сооружений / А.Р. Ржаницын // Строительная промышленность. – 1947. – № 8. – С. 11–14.
2. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
3. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.
4. Стрелецкий, Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений / Н.С. Стрелецкий. – М.: Стройиздат, 1947. – 95 с.
5. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
6. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.В. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
7. Комохов, П.Г. Долговечность бетона и железобетона / П.Г. Комохов, В.М. Латынов, Р.Ф. Вагапов. – Уфа: Белая река, 1988. – 216 с.
8. Мощанский, Н.А. Прочность и стойкость бетона / Н.А. Мощанский. – М.: Госстройиздат, 1951. – 175 с.
9. Гусев, Б.В. Математические модели процессов коррозии бетона / Б.В. Гусев, А.С. Файтусович, В.Ф. Степанова, Н.К. Розенталь. – М., 1996. – 102 с.
10. Селяев, В.П. Расчет долговечности железобетонных конструкций / В.П. Селяев // Вестн. Морд. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 140–149.
11. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. – М.: РААСН, 2001. – 284 с.
12. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
13. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
14. Степанова, В.Ф. Долговечность бетона / В.Ф. Степанова. – М., 2014. – 126 с.
15. Чирков, В.П. Основы теории расчета ресурса железобетонных конструкций / В.П. Чирков // Бетон и железобетон. – 1990. – № 10. – С. 15–17.
16. Кудзис, А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций / А.П. Кудзис. – Вильнюс: Мокслас, 1985. – 156 с.
17. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л.М. Пухонто. – М., 2004. – 423 с.
18. Бондаренко, В.М. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений / В.М. Бондаренко, Н.В. Ключева // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 1. – С. 4–12.
19. Бондаренко, В.М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 28–33.
20. Колчунов, В.И. Напряженно-деформированное состояние нагруженного и коррозионно-поврежденного железобетона в зоне наклонных трещин / В.И. Колчунов,

М.С. Губанов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 2 (42). – С. 11–21.

21. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.

References

1. Rzhantsyn, A.R. Determination of the safety factor of structures / A.R. Rzhantsyn // Construction industry. – 1947. – № 8. – P. 11–14.
3. Rzhantsyn, A.R. The theory of calculation of building structures for reliability / A.R. Rzhantsyn. – M.: Stroyizdat, 1978. – 239 p.
3. Selyaev, V.P. Physicochemical foundations of fracture mechanics of cement composites: monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of Mordovian University, 2018. – 220 p.
4. Streletsky, N.S. Fundamentals of statistical accounting of the safety factor of structures / N.S. Streletsky. – M.: Stroyizdat, 1947. – 95 p.
5. Alekseev, S.N. Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment / S.N. Alekseev, N.K. Rosental. – M.: Stroyizdat, 1976. – 205 p.
6. Bazhenov, Y.M. Modified high-quality concrete / Y.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – M.: ASV, 2006. – 368 p.
7. Komokhov, P.G. Durability of concrete and reinforced concrete / P.G. Komokhov, V.M. Latynov, R.F. Vagapov. – Ufa: White River, 1988. – 216 p.
8. Moshchanskiy, N.A. Strength and resistance of concrete / N.A. Moshchanskiy. – M.: Gosstroyizdat, 1951. – 175 p.
9. Gusev, B.V. Mathematical models of concrete corrosion processes / B.V. Gusev, A.S. Faitusovich, V.F. Stepanova, N.K. Rozental. – M., 1996. – 102 p.
10. Selyaev, V.P. Calculation of durability of reinforced concrete structures / V.P. Selyaev // Vestnik of Mordovian University. – 2008. – № 4. – P. 140–149.
11. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Y.A. Sokolova. – M.: RAASN, 2001. – 284 p.
12. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev. – M.: Stroyizdat, 1987. – 264 p.
13. Moskvina, V. M. Corrosion of concrete and reinforced concrete. Methods of their protection / V. M. Moskvina, F. M. Ivanov, S. N. Alekseev, E. A. Guzev. – M.: Stroyizdat, 1980. – 536 p.
14. Stepanova, V.F. Durability of concrete / V.F. Stepanova. – M., 2014. – 126 p.
15. Chirkov, V.P. Fundamentals of the theory of calculating the resource of reinforced concrete structures / V.P. Chirkov // Concrete and reinforced concrete. – 1990. – № 10. – P. 15–17.
16. Kudzis, A.P. Assessment of the reliability of reinforced concrete structures / A.P. Kudzis. – Vilnius: Mokslas, 1985. – 156 p.
17. Puhonto, L.M. Durability of reinforced concrete structures of engineering structures / L.M. Puhonto. – M., 2004. – 423 p.
18. Bondarenko, V.M. To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage / V.M. Bondarenko, N.V. Klyueva // Proceedings of universities. Building. – 2008. – No. 1. – P. 4–12.
19. Bondarenko, V.M. The concept and directions of development of the theory of constructive safety of buildings and structures under power and environmental influences / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov // Industrial and civil construction. – 2013. – No. 2. – P. 28–33.
20. Kolchunov, V.I. Stress-strain state of loaded and corrosion-damaged reinforced concrete in the zone of inclined cracks / V.I. Kolchunov, M.S. Gubanov // Scientific bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. – 2016. – No. 2 (42). – P. 11–21.
21. Bolotin, V.V. Methods of the theory of probability and the theory of reliability in the calculations of structures / V.V. Bolotin. – M.: Stroyizdat, 1981. – 351 p.

УДК 69.059.032

DOI 10.54734/20722958_2023_3_122

ООО «Современные строительные решения»

Россия, г. Пенза, ул. Аксакова, 38г

Саденко Денис Сергеевич,

кандидат технических наук, главный инженер

E-mail: sadenko_d@list.ru

Пензенский казачий институт технологий (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»

Россия, г. Пенза, ул. Володарского, д. 6

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат технических наук, зав. кафедрой «Защита в чрезвычайных ситуациях»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,

ул. Германа Титова, д. 28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8412) 48-74-77

Арискин Максим Васильевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

LLC «Modern building solutions»

Russia, Penza, 38g, Aksakova St.

Sadenko Denis Sergeevich,

Candidate of Sciences, Leading engineer

E-mail: sadenko_d@list.ru

Penza Cossack Institute of Technology (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University)»

Russia, Penza, 6, Volodarsky St.

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Head of the Department «Protection in emergency situations»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,

tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Ariskin Maksim Vasilievich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building Structures»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО УСИЛЕНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОНОЛИТНОГО МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА

Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин

Рассмотрен процесс научно-технического сопровождения строительно-монтажных работ по усилению строительных конструкций строящегося монолитного многоэтажного жилого дома на реальном примере. Представлены алгоритм проведения работ и состав отчётной документации по их реализации. Показано, что научно-техническое сопровождение строительства позволит неразрывно провести весь цикл работ, проконтролировать все этапы и снизить их себестоимость для заказчика.

Ключевые слова: строительные конструкции, научно-техническое сопровождение, усиление, монолитное строительство, технология, строительно-монтажные работы

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF WORKS TO STRENGTHEN THE BUILDING STRUCTURES OF A MONOLITHIC MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING

D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin

On a real example, a method for conducting scientific and technical support of construction and installation works, to strengthen the building structures of a monolithic multi-storey residential building under construction is given. The algorithm of the work, the order and composition of the

reporting documentation for their implementation is given. That the scientific and technical support of construction will allow to carry out the entire cycle of work, control all stages and reduce their cost for the customer it is shown.

Keywords: building structures, scientific and technical support, reinforcement, monolithic construction, technology, construction and installation works

Монолитное строительство – один из самых распространенных видов жилищного строительства, который сегодня требует разработки новых методов и путей решения возникающих в процессе строительства проблем (например, недостижение проектных значений при бетонировании монолитных конструкций [1]). Авторы предлагают проведение комплекса проектно-экспертных работ, объединенных термином «научно-техническое сопровождение» (НТС). За аналог взято научное руководство при работах на объектах культурного наследия, где необходимо при выполнении работ вести строительный контроль (технический надзор), авторский надзор и научное руководство. Потенциальному заказчику требуется найти и скоординировать работу нескольких организаций, что крайне затруднительно в случае, когда организация не обладает необходимым штатом сотрудников и не имеет опыта проектирования. Проведение НТС осуществляет одна организация (или является генеральным исполнителем работ), что значительно увеличивает качество и скорость выполнения работ и, как следствие, снижает экономические издержки.

Рассмотрим реальный объект НТС (строящийся жилой дом (рис.1); каркасно-монолитный с техническим подпольем, техническим этажом (теплый чердак); модульной котельной, расположенной на крыше; жилых этажей – 16). В ходе проведения строительно-монтажных работ была нарушена технология проведения бетонных работ в зимнее время, вследствие чего образовалась угроза возникновения аварийной ситуации. В ходе НТС были проведены следующие мероприятия:

- осуществлено детально-инструментальное обследование строительных конструкций, в том числе лабораторные испытания [2];
- сделан расчет конструкций в программном комплексе SCAD [3];
- разработан (в процессе вариантного проектирования) проект усиления несущих конструкций;
- разработана сметная документация;
- осуществлен авторский надзор за выполненными работами;
- составлено и утверждено всеми необходимыми надзорными инстанциями заключение по результатам работ.



Рис.1. Объект научно-технического сопровождения

На первом этапе было проведено обследование конструкций. В ходе него ультразвуковым методом была определена прочность всех несущих бетонных конструкций: пилонов, колонн и плит (в возрасте более 28 суток). Следует отметить, что проект дома выполнен с учетом «рационального» проектирования (с использованием максимально возможной жилой площади). Этого удалось достичь за счет архитектурных планировок, реализованных с использованием пилонов в качестве основных несущих конструкций здания; отдельные пилоны воспринимали нагрузку практически на пределе своей несущей способности (с ликвидацией резерва прочности с predisположенностью к возникновению аварийных ситуаций).

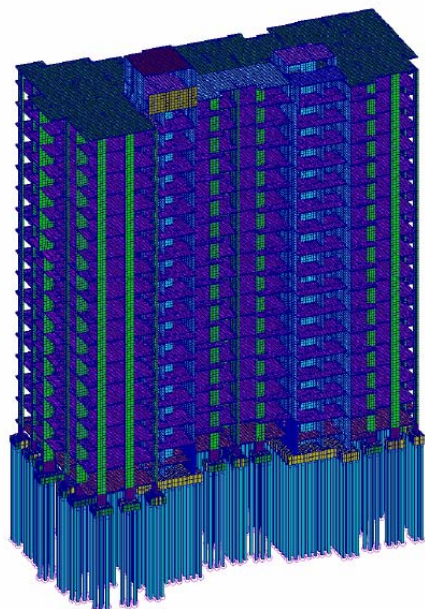


Рис. 2. Армирование монолитных пилонов

либо имеют неправильную форму (в расчетной схеме исключаются).

Фактический класс бетона колебался от В20 до В30 (при классе бетона В30 в проектной документации). Класс бетона не полностью соответствовал проектным решениям: возникла необходимость дополнительного расчета при разных классах бетона (В25 и В20) без изменения нагрузок. Проводился сравнительный анализ полученных результатов, представленных в проектной документации: пилонов (арматура А500 $\phi 16$ мм с шагом 200 мм) и диафрагм жесткости (А500 $\phi 10$ мм с шагом 200 мм); шаг по краям – 150 мм (рис. 2).

Практически все элементы монолитных конструкций с классом бетона В25 проходят по запасу прочности (за исключением нескольких элементов, в которых напряжения колеблются от 9 до 29 $\text{см}^2/\text{м}$, изополя на рис. 3, 4); скачки напряжений имеют локальный характер и находятся либо в стыках горизонтальных и вертикальных элементов, в дальнейшем эти элементы для упрощения

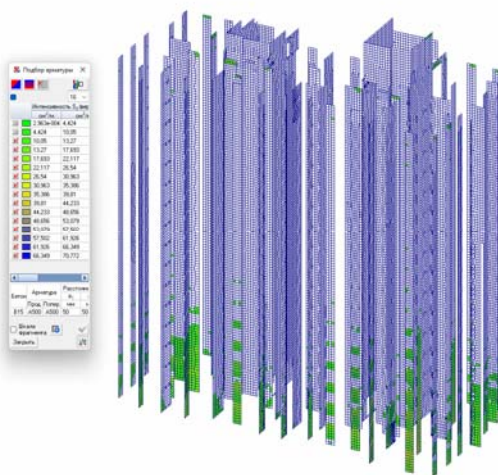


Рис. 3. Расчет с применением бетона В20

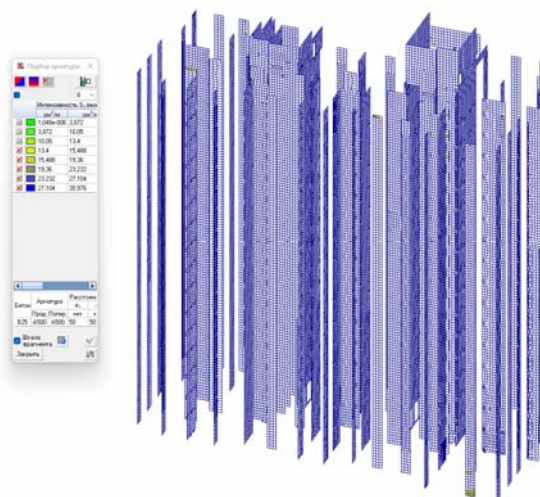


Рис. 4. Расчет с применением бетона В25

По полученным результатам была уточнена расчетная схема: жесткости всех элементов принимались в соответствии с классом бетона В25, а элементы с меньшим классом бетона – в соответствии с лабораторными исследованиями – В20. Оказалось необходимым усиление наиболее нагруженных пилонов и стен (рис. 5, 6). Был разработан и реализован специальный проект в составе разделов: «Конструктивные

решения», «Проект организации строительства», «Сметная документация». Естественно, была проведена негосударственная экспертиза данных разделов проектной документации (с положительным решением). Далее в процессе строительно-монтажных работ по усилению строительных конструкций был проведен авторский надзор с целью исключения отклонения от проектных решений. Составлены и утверждены с заинтересованными организациями заключения (по результатам инструментального обследования; проведению авторского надзора); скомпонован расчетный том; проверена сметная документация на соответствие сметных нормативов. По этим результатам с минимальными затратами удалось восстановить несущую способность отдельных ослабленных элементов здания; предотвратить угрозу возникновения аварийной ситуации со снижением себестоимости проведения работ по усилению строительных конструкций.

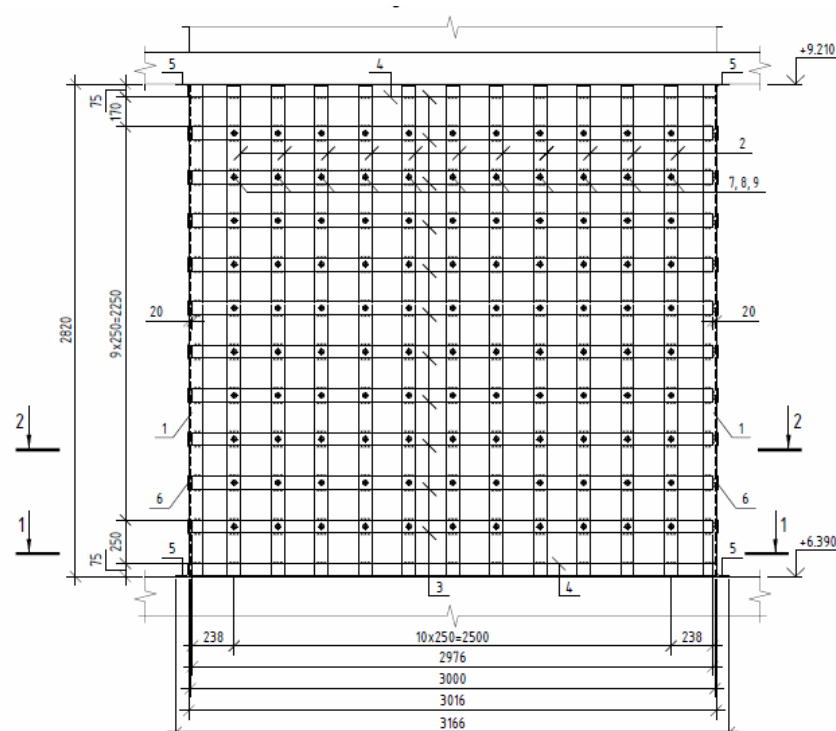


Рис. 5. Пример усиления одной из стен



Рис. 6. Усиленные конструкции

Очевидна необходимость выполнения работ по научно-техническому сопровождению на всех объектах капитального строительства (особенно это касается уникальных зданий и сооружений) начиная со старта строительства и включения в её состав строительного контроля (технического надзора), что позволит осуществлять весь цикл работ с возможностью контроля на всех этапах строительства.

Список литературы

1. Саденко, Д.С. Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 105–109.
2. Саденко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Аriskin // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.
3. Корягина, С.А. Информатизация управления строительством как основы предотвращения техногенных аварий / С.А. Корягина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 11–31.
4. Гарькин, И.Н. Из опыта экспертизы конструкций зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, С.В. Ключев, Д.С. Саденко // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 66–74.
5. Гарькина, И.А. Из опыта разработки материалов специального назначения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 235.
6. Ефименко, Е.А. Определение оптимального расположения опор в плите перекрытия промышленного здания с использованием стохастических методов / Е.А. Ефименко, М.Ю. Беккиев, Д.Р. Маилаян, А.С. Чепурненко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 138–146.
7. Жуйков, С.В. Эксергетический анализ здания как ключевого элемента системы теплообеспечения / С.В. Жуйков // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 23–40.
8. Ерёмин, К.И. Обзор аварий и сооружений, произошедших в 2010 году / К.И. Ерёмин, Н.А. Шишкина // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сборник научных трудов. – Магнитогорск: ООО «Велд», 2011. – С.1–20.
9. Сабитов, Л.С. Совершенствование конструкций башенных сооружений и их численное моделирование на примере башни ветроэлектрической установки / Л.С. Сабитов, Л.Р. Маилаян // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 46–50.
10. Абрашитов, В.С. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / В.С. Абрашитов, А.Н. Жуков, А.В. Устинова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 67–70.
11. Варламова, Т.В. Учет динамических воздействий при проектировании консольных конструкций / Т.В. Варламова, Т.К. Ксенофонтова, А.С. Верхоглядова, О.В. Мареева // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 6. – С. 54–63.
12. Кузин, Н.Я. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий / Н.Я. Кузин, С.Г. Багдоев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С.79–82.

References

1. Sadenko, D.S. Causes of defects in the production of monolithic reinforced concrete structures associated with concrete corrosion / D.S. Sadenko, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4 (45). – P. 105–109.
2. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 89–95.

3. Koryagina, S.A. Informatization of construction management as the basis for the prevention of man-made accidents / S.A. Koryagina // *Stroitelnye materialy i izdeliya*. – 2021. – Vol. 4, No. 4. – P. 11–31.
4. Garkin, I.N. From the experience of examination of structures of buildings and structures in the conditions of the Far North / I.N. Garkin, I.A. Garkina, S.V. Klyuev, D.S. Sadenko // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 4 (53). – P. 66–74.
5. Garkina, I.A. From the experience of developing materials for special purposes / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // *Modern problems of science and education*. – 2014. – No. 5. – P. 235.
6. Efimenko, E.A. Determining the optimal location of supports in the floor slab of an industrial building using stochastic methods / E.A. Efimenko, M.Yu. Bekkiev, D.R. Mailyan, A.S. Chepurnenko // *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. – 2020. – No. 1. – P. 138–146.
7. Zhuikov, S.V. Exergy analysis of the building as a key element of the heat supply system / S.V. Zhuikov // *Building materials and products*. – 2021. – Vol. 4, No. 3. – P. 23–40.
8. Eremin, K.I. Overview of accidents and structures that occurred in 2010 / K.I. Eremin, N.A. Shishkina // *Prevention of accidents in buildings and structures: a collection of scientific papers*. – Magnitogorsk: Weld LLC, 2011. – C.1–20.
9. Sabitov, L.S. Improving the design of tower structures and their numerical modeling on the example of a wind turbine tower / L.S. Sabitov, L.R. Mailyan // *Construction and architecture*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 46–50.
10. Abrashitov, V.S. Determining the categories of the technical condition of building structures of buildings and structures / V.S. Abrashitov, A.N. Zhukov, A.V. Ustinova // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – No. 4 (29). – P. 67–70.
11. Varlamova, T.V. Accounting for dynamic impacts in the design of cantilever structures / T.V. Varlamova, T.K. Ksenofontova, A.S. Verkhoglyadova, O.V. Mareeva // *Building materials and products*. – 2022. – Vol. 5, No. 6. – P. 54–63.
12. Kuzin, N.Ya. Assessment of external factors on the bearing capacity of structures of civil buildings / N.Ya. Kuzin, S.G. Bagdov // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – No. 2. – P. 79–82.

УДК 004: 69.01

DOI 10.54734/20722958_2023_3_128

*Петрозаводский государственный университет**Petrozavodsk State University*

Россия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33, тел. (8142) 78 51-40

Russian Federation, 185910, Petrozavodsk, 33, Lenin Avenue, tel. (8142) 78 51-40

Бочарова Екатерина Сергеевна, магистрант**Bocharova Ekaterina Sergeevna**, Master's student**Селютина Любовь Федоровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и организация строительства»**Selutina Lyubov Fedorovna**, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Technology and Organization of Construction»

E-mail: selutinalf@mail.ru

E-mail: selutinalf@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОПИЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ ПОСТРОЙКИ СЕРЕДИНЫ XX ВЕКА

Е.С. Бочарова, Л.Ф. Селютина

Представлена информация, подтверждающая эффективность внедрения технологий информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла зданий различных конструктивных систем. Приведены данные о стропильных системах зданий в Томске, Петрозаводске и Кондопоге. Созданы информационные модели стропильных систем гражданских зданий в Петрозаводске и Кондопоге. Указана ценность стропильной системы и ее значение для сохранения культурного наследия и развития перспективных областей использования деревянных стропильных систем.

Ключевые слова: технология BIM, стропильная система, гражданские здания, информационная модель, программы Graphisoft Archicad, Autodesk AutoCAD Architecture, Autodesk Navisworks 3D Viewer

INFORMATION MODELING OF RAFTER SYSTEMS OF BUILDINGS CONSTRUCTED IN THE MIDDLE OF THE TWENTIETH CENTURY

E.S. Bocharova, L.F. Selutina

The information confirming the effectiveness of information modeling technologies introduction at all stages of the life cycle of buildings of various structural systems is presented. Data on the rafter systems of buildings in Tomsk, Petrozavodsk and Kondopoga are given. Information models of rafter systems of civil buildings in Petrozavodsk and Kondopoga are made. The value of the truss system and its significance for preservation cultural heritage and the development of promising areas of wooden truss systems use are indicated.

Keywords: BIM technology, rafter system, civil buildings, information model, programs Graphisoft Archicad, Autodesk AutoCAD Architecture, Autodesk Navisworks 3D Viewer

Введение

BIM-технологии позволяют создавать сооружения разных конструктивных систем с учетом многих факторов, возникающих при проектировании сооружения, его строительстве и эксплуатации. BIM-технологии включают архитектурную, конструктивную и коммуникационную модели. Большинство операций при применении BIM-технологий выполняется автоматически с помощью специальных программ, таких, как, например, ArchiCAD, Renga, Navisworks. Применение BIM-технологий позволяет достичь ряда преимуществ: создается полноценная информационная 3D-модель здания с необходимыми присвоенными атрибутами, повышается уровень автоматизации, ускоряется процесс создания рабочей документации, а также упрощается обмен информацией между специалистами различных направлений, обеспечивается более высокая точность конструкций и большая безопасность [1].

Опыт информационного обеспечения при реставрации памятников архитектуры в Екатеринбурге, являющихся яркими примерами творчества архитектора М.П. Малахова, – дома главного начальника горных заводов (1818 г.) и малой усадьбы Рязанова (I пол. XIX века) – приведен в работе [2].

Возможностями BIM в информационном и техническом сопровождении культурно-исторических объектов являются: компьютерная паспортизация, проведение комплексного анализа и проверка научных гипотез, возможность мониторинга состояния объекта, применение библиотечных элементов в современном проектировании для связи с традициями исторического наследия [2].

Применение BIM при исследовании объектов культурного наследия подтвердило, что каждый раздел проекта поддерживается информацией из BIM-модели. Это исторические справки, иллюстрации, 3D-модели всего объекта и его отдельных элементов, все виды чертежей.

Исследование историко-архитектурного наследия предполагает большую аналитическую работу с архивными и проектными документами, старыми фотографиями.

Информационные модели включают наборы объемных представлений памятников архитектуры и их элементов, общую информацию об объектах: текстовое описание, изображения, рабочую проектно-сметную документацию.

Информационная модель становится незаменимым инструментом работы специалистов музеев, государственных структур различного уровня по охране памятников архитектуры. Это точная и детальная информация для архитекторов, реставраторов, историков, искусствоведов, этнографов, археологов. Практические рекомендации по применению новой технологии информационного моделирования зданий в деятельности музеев расширяют возможности работы с недвижимыми экспонатами и позволяют поднять на новый уровень работу по исследованию и сохранению объектов культурного наследия [3].

Определены требования к модели: содержание комплексной исследовательской информации об архитектурно-художественных особенностях объекта, его количественных характеристиках, описывающих состояние здания и допускающих возможность их всестороннего наполнения и последующей корректировки, сведения о результатах проводимых обследований [3].

Для памятников архитектуры моделирование осложняется почти полным отсутствием проектной документации и изменениями, произошедшими в здании за время его существования. Поэтому архитектурное и особенно инженерное обследование сооружения должны быть безошибочными.

Информационная модель становится местом и средством не только хранения сведений о памятнике, но и инструментом при исследовательской работе с этой информацией. Расширяются возможности применения BIM-технологий при исследовательской работе, в учебно-просветительской и коммуникационной деятельности [4]. Модель также тесно связана с мониторингом состояния объекта и его возможным использованием.

При создании модели памятника архитектуры обязательно появляются библиотечные элементы, которые затем могут использоваться и в современном проектировании и строительстве [4].

В данной работе представлены результаты реализации информационных моделей стропильных систем гражданских зданий в Петрозаводске и Кондопоге (Республика Карелия).

Стропильные системы гражданских зданий

Ранее древесина применялась в простых конструктивных формах — в виде стоек и балок покрытий при устройстве жилищ и других простейших зданий. С течением времени искусство строить из древесины совершенствовалось. Накапливая из поколения в поколение опыт и мастерство, русские зодчие создавали непревзойденные по уровню строительного искусства деревянные сооружения.

Нами проведено моделирование стропильных систем зданий, не являющихся объектами культурного наследия, но их конструктивные решения являются ценными и

значимыми для разработки и дальнейшего прогрессивного развития деревянных конструкций. Такими зданиями является здание лабораторного корпуса в Петрозаводске и жилой дом в Кондопоге.

В исследованиях исторических зданий большое внимание уделяется исследованию деревянных крыш [5, 6, 7]. Скатные крыши являются одной из разновидностей покрытий зданий. Несущими конструкциями скатной крыши являются стропила.

При устройстве крыш распространены наслонные и висячие типы стропильных систем. «По простоте устройства и дешевизне наслонные стропила надо предпочитать всем остальным системам и всегда устраивать их, если только в здании есть продольные внутренние капитальные или поперечные стены, стоящие не далее сажени (2,13 м) друг от друга» [8].

В историческом центре Томска известны значительное количество памятников архитектуры конца XIX – начала XX в.

Устройство стропильной системы Томского Императорского университета осуществлено по наслонному типу и обладает сложной конструктивной схемой, т. к. пролет между опорными стенами достигает 11,36 м, а расстояние между наружными стенами составляет 23,6 м.

В здании духовной семинарии (бывшее училище связи) выявлено два типа стропильных систем: наслонная в качестве несущей конструкции для кровли и висячая для поддержания деревянного перекрытия над актовым залом, которое также укреплено декоративными деревянными кронштейнами. Висячая стропильная система с одной бабкой и двумя подкосами не подвергается нагрузке со стороны кровли. Наслонная стропильная система состоит из стропильных ног и двух подкосов с опиранием на центральную стену. На эту же стену опирается и коньковый брус. Пролет наслонной стропильной системы около 19 м. Длина неподкрепленного участка стропильной ноги около 6 м, что больше расчетных и рекомендованных параметров конца XIX в. в 4,3 м [6]. Объяснить это можно тем, что одна сторона крыши обращена на юг, а второй скат более короткий и имеет примыкание с крышей перпендикулярно расположенному объему здания, что минимизирует снеговую нагрузку. Конструкция выполнена из окантованных бревен. Шаг между стропильными ногами 2 м.

Материалы и методы

Цель исследования — построение виртуальной копии стропильной системы существующего здания для дальнейшего исследования и поиска возможного усиления и реконструкции элементов стропильной системы.

Задачи исследования: сбор архивно-исторических данных по исследуемым объектам, натурное обследование зданий, геометрические измерения; фотофиксация, определение характерных особенностей стропильных элементов и узлов соединения конструкций.

По результатам выполненных работ подготовлены информационные модели стропильных систем крыши лабораторного корпуса в Петрозаводске и жилого дома в Кондопоге.

Для создания информационных моделей использовались программы: Graphisoft Archicad (помимо инструментов в программе использовался определенный набор библиотек: Archicad Library 24, CI Tools Library 24 и атрибутов, таких, как материал конструкции); Autodesk AutoCAD Architecture Autodesk и Navisworks 3D Viewer.

Результаты исследования

Четырехскатная крыша трехэтажного здания в Кондопоге

Здание построено в 1959 г. Размеры здания в плане составляют 12×50 м.

Здание с продольными несущими стенами. Наружные и внутренние стены — кирпичная кладка. Стропильная система выполнена по наслонной системе. Конструктивной особенностью наслонной системы здания является наличие подкосов, расходящихся от лежня под углом 65°. Нижним концом подкосы опираются на лежень, а верхней опорой являются прогоны. Прогоны объединены ригелями. Расстояние между ригелями совпадает с шагом подкосов (рис. 1–3).

Обследования здания выполнялись в 2010 и 2019 годах.

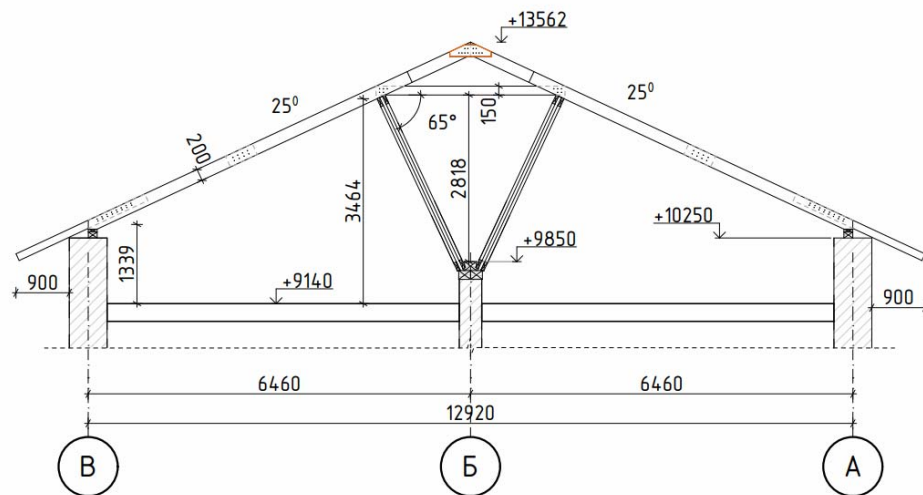


Рис. 1. Поперечное сечение чердачного помещения жилого здания в Кондопоге

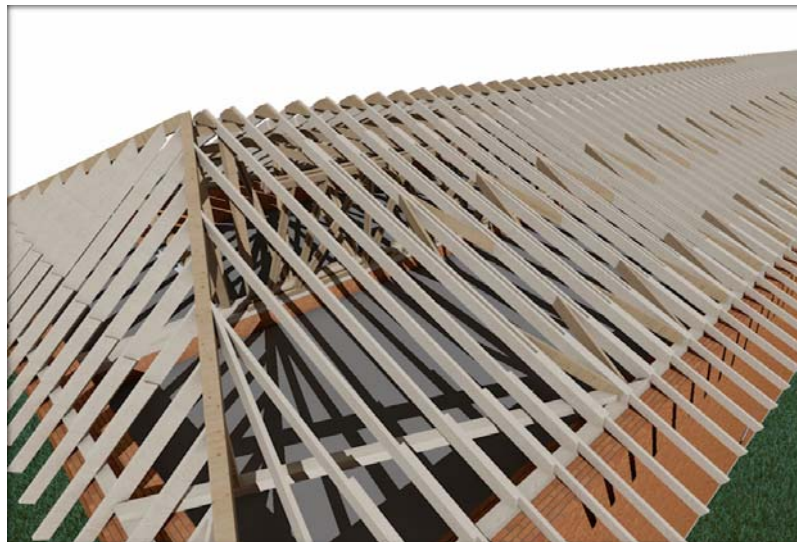


Рис. 2. Информационная модель четырехскатной крыши жилого здания в Кондопоге



Рис. 3. Фрагмент стропильной системы жилого здания в Кондопоге

Висячие стропила крыши трехэтажного здания в Петрозаводске

Здание построено в 1962 г.

Несущими конструкциями крыши в средней части лабораторного корпуса являются треугольные фермы с нисходящими раскосами. Фермы на лобовых врубках – один из самых старых и надежных видов деревянных ферм. Фермы обладают высокой несущей способностью, просты в изготовлении.

К простейшим врубкам относятся: лобовые врубки, лобовые упоры, трехлобовые упоры, шипы. С появлением новых прогрессивных типов связей некоторые виды врубок в настоящее время не применяются, но простейшие из них сохранили свое значение. Покрытие отапливаемого гражданского здания устроено с подвесным потолком.

Расстояние между фермами вдоль здания составляет 3 м.

Треугольная брусчатая ферма имеет пролет 8,65 м (рис. 4). Верхний пояс представляет собой четыре панели, такой же брусчатый нижний пояс, брусчатые раскосы; средняя и промежуточные стойки выполнены из арматурных стержней. Нагрузка от подвесного потолка передается промежуточными стойками – арматурными стержнями – на узлы верхнего пояса. Все раскосы этой фермы работают только на сжатие и имеют деревянное прямоугольное сечение такой же ширины, как и верхний пояс. Стойки фермы работают только на растяжение.



Рис. 4. Информационная модель стропильной фермы здания в Петрозаводске

Геометрические размеры сечений деревянных элементов фермы: верхний пояс: 150×190 мм, нижний пояс: 150×200 мм, раскосы: 150×170 мм.

Узлы брусчатой треугольной фермы

Конструкции узлов фермы являются важнейшими деталями, от которых в большей степени зависит их долговечность, надежность, прочность.

Существуют три варианта решений опорных узлов треугольной фермы: лобовая врубка с одним или двумя зубьями либо лобовой упор на металлических натяжных хомутах.

Стыки верхнего пояса ферм осуществляются в узлах лобовым упором и перекрываются парными накладками на болтах.

Стыки нижнего пояса ферм при пролетах до 12 м устраиваются в центральном узле и перекрываются деревянными накладками на болтах или нагелях.

Опорный узел

Опорный узел представляет собой лобовой упор. В концевую часть нижнего пояса вводится нижняя часть торца бруса верхнего пояса. Усилие, возникающее в сжатом элементе, передается опорному вкладышу всей поверхностью торца элемента. Вертикальная составляющая сжимающего усилия передается на опорную подушку, а горизонтальная составляющая – через стальные тяжи, деревянные накладки и нагели – на растянутый элемент. Такое решение более надежно, чем врубка, так как исключена работа на скалывание «хвоста» фермы (см. рис. 4).

Коньковый узел фермы (рис. 5) выполнен в виде наклонных лобовых упоров торцов брусьев верхнего пояса и перекрывается двусторонними накладками из досок, прикрепленных к брусьям верхнего пояса болтами. Узлы примыкания раскосов к поясам выполняются при помощи лобовых врубок с одним зубом и дополнительно крепятся болтами или скобами для предотвращения случайного выхода из плоскости. В среднем узле нижнего пояса сходятся два раскоса, которые упираются в специальную бобышку со скошенными торцами. Введение такой бобышки уменьшает ослабление нижнего пояса (рис. 6).

Пространственная жесткость покрытия обеспечивается связями, расположенными в плоскости верхнего пояса и связывающими фермы попарно.



Рис. 5. Информационная модель конькового узла фермы

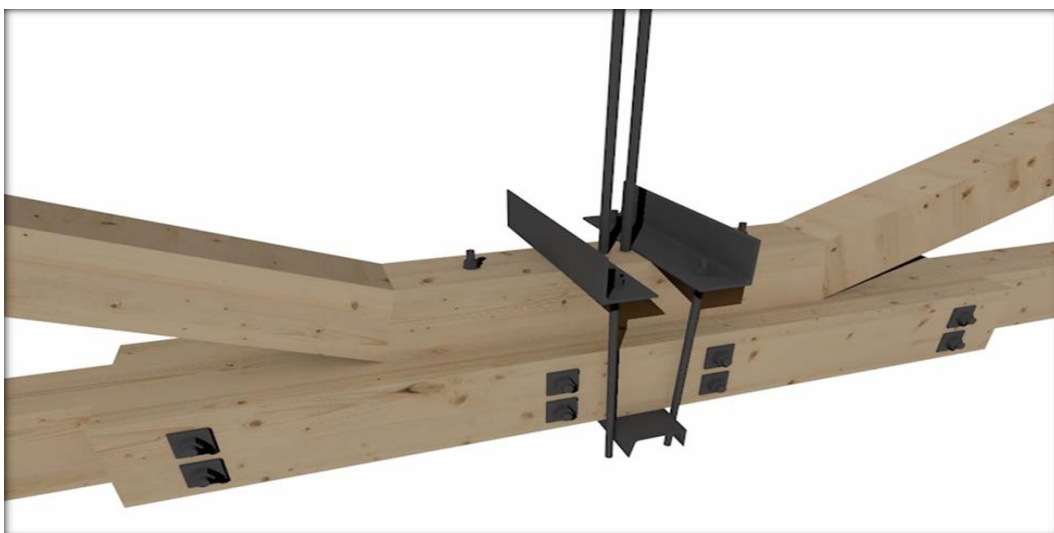


Рис. 6. Информационная модель среднего узла нижнего пояса фермы

Выводы

Опыт зарубежных и отечественных компаний подтверждает актуальность и эффективность внедрения технологий информационного моделирования на стадиях проектирования, строительства, эксплуатации.

Применение BIM-технологий к существующим зданиям показывает преимущества технологии BIM перед традиционным проектированием: появляется возможность моделировать изменения в конструкции здания, отслеживать текущее состояние здания (что особенно важно для памятников архитектуры), своевременно принимать меры по реставрации, грамотно эксплуатировать существующие объекты.

Полученные в результате моделирования элементы позволяют создавать библиотеки элементов, характеризующих определенную историческую эпоху и стиль. Библиотекой можно затем пользоваться при проектировании и реставрации других зданий и памятников архитектуры того же периода и в новом строительстве.

Комплексная информационная модель рассматривается не только как источник всех видов проектно-конструкторской документации, но и как средство управления информацией об объекте на последующих этапах жизненного цикла, в том числе этапах эксплуатации, мониторинга и реконструкции.

Выполнены информационные модели стропильных систем гражданских зданий в Петрозаводске и Кондопоге. Выбор данных зданий определен конструктивными решениями стропил наслонного и висячего типов строительства середины XX века (использование стропил наслонного типа с помощью подкосов). Информационные модели представляют научный интерес и имеют важное практическое значение для создания надежных и долговечных деревянных конструкций в современном строительстве.

Список литературы

1. Баженов, А.А. Перспективы применения BIM-технологий в современной строительной отрасли / А.А. Баженов // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы II международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 года. – С. 40–44.
2. Захарова, Г.Б. Применение BIM в реставрации объектов культурного наследия / Г.Б. Захарова // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы II международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 года. – С. 112–118.
3. Козлова, Т.И. Информационная модель недвижимого объекта культурного наследия как новый инструмент работы в музеефикации практике / Т.И. Козлова // Вестник Томского государственного университета. История. – 2013. – № 3(23). – С. 33–37.
4. Талапов, В.В. BIM-технология для реставрации архитектурных памятников деревянного зодчества / В.В. Талапов. – URL: <https://integral-russia.ru>
5. Кутенков, Ю.О. Деревянные конструкции крыш в общественных зданиях России на рубеже XIX–XX веков / Ю.О. Кутенков, Е.Н. Колокольцева // Избранные доклады 61-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 23–24 апр. 2015 г. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2015. – С. 688–693.
6. Кутенков, Ю.О. Результаты исследования стропильных систем памятников архитектуры г. Томска / Ю.О. Кутенков, Е.Н. Колокольцева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – №3 (56). – С. 40–48.
7. Селютина, Л.Ф. Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла / Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1. – С. 119–125.
8. Брониш, Л. О. Краткое руководство к строительному искусству и архитектуре. – Вып. 2 / Л.О. Брониш, В. Фишер. – СПб.: Издание Г.В. Гольстена, 1914. – 227 с.

References

1. Bazhenov, A.A. Prospects for the use of BIM in the modern construction industry / A.A. Bazhenov // BIM modeling in construction and architecture tasks: materials of the II International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, May 15–17, 2019. – P. 40–44.
2. Zakharova, G.B. The use of BIM in restoration of cultural heritage objects / G.B. Zakharova // BIM-modeling in the tasks of construction and architecture: materials of the II International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, May 15–17, 2019. – P. 112–118.
3. Kozlova, T.I. Information model of an immovable object of cultural heritage as a new tool of work in museumification practice / T.I. Kozlova // Bulletin of Tomsk State University. History. – 2013. – № 3(23). – P. 33–37.
4. Talapov, V.V. BIM-technology for the restoration of architectural monuments of wooden architecture / V.V. Talapov. – URL: <https://integral-russia.ru>
5. Kutenkov, Yu.O. Wooden roof structures in public buildings of Russia at the turn of the XIX–XX centuries / Yu.O. Kutenkov, E.N. Kolokoltseva // Selected reports of the 61st University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists, Tomsk, April 23–24, 2015 – Tomsk: Publishing House: Tomsk State Architectural-University of Civil Engineering, 2015. – P. 688–693.
6. Kutenkov, Yu.O. Results of the study of truss systems of architectural monuments of Tomsk / Yu.O. Kutenkov, E.N. Kolokoltseva // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2016. – №3 (56). – P.40–48.
7. Selyutina, L.F. Wooden structures of a building built in 1914 in the village of Essoila / L.F. Selyutina // Regional architecture and construction. – 2020. – No. 1. – P.119–125.
8. Bronish, L.O. A brief guide to the art of construction and architecture. Issue 2 / L.O. Bronish, V. Fischer. – SPb.: Edition G.V. Golsten, 1914. – 227 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Комаров Виктор Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: komarov58reg@yandex.ru

Ласьков Сергей Николаевич,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: laskovsn@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Komarov Victor Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department «Building
Structures»
E-mail: komarov58reg@yandex.ru

Laskov Sergey Nikolaevich,
Assistant of the Department «Building
Structures»
E-mail: laskovsn@yandex.ru

СБОРНО-МОНОЛИТНЫЕ УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ: ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

В.А. Комаров, С.Н. Ласьков

Анализируются результаты экспериментальных исследований сборно-монолитных узлов (со скрытой консолью) сопряжения ригелей с колоннами железобетонных каркасов многоэтажных зданий с различными вариантами армирования приопорной зоны ригелей. Рассматриваются особенности деформирования, трещинообразования и разрушения узловых соединений при изменении пролета среза.

Ключевые слова: многоэтажные каркасы, сборно-монолитные узлы, скрытая консоль, опорная зона ригеля, схемы разрушения

PREFABRICATED MONOLITHIC JUNCTIONS OF LOAD- BEARING STRUCTURES OF MULTI-STOREY BUILDINGS: FEATURES OF DEFORMATION, CRACKING AND DESTRUCTION

V.A. Komarov, S.N. Laskov

The results of experimental studies of prefabricated monolithic units (with a hidden console) of coupling crossbars with columns of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with various reinforcement options for the support area of crossbars are analyzed. The features of deformation, cracking and destruction of nodal joints at changing the cut span are considered.

Keywords: multi-storey frames, prefabricated monolithic units, hidden console, base zone of the cross bar, destruction schemes

Сборно-монолитный каркас является одним из наиболее перспективных вариантов несущего железобетонного каркаса многоэтажного здания, в состав которого входят сборные и монолитные конструкции.

Широкое внедрение сборно-монолитных конструктивных систем затруднено в силу их малой изученности, недостатка экспериментальных данных и, как следствие, практически полного отсутствия нормативно-технической базы для проектирования [1–2].

Наиболее ответственными элементами являются сборно-монолитные узлы сопряжения ригелей с колоннами, обеспечивающие пространственную работу каркаса.

Сборно-монолитные узлы запроектированы подобно технологии устройства узловых соединений конструктивной системы СМКД.

В основе конструктивной системы СМКД лежит рамная либо рамно-связевая система, состоящая из трех основных железобетонных элементов: колонн, ригелей и плит несъемной опалубки. Дополнительно, в каждом конкретном случае, в него могут включаться диафрагмы и связи жесткости. Сборные предварительно напряженные ригели служат ребрами монолитного перекрытия, с которыми сопрягаются выпуски арматуры. В торцах ригелей выполняются пазы для сопряжения с колоннами.

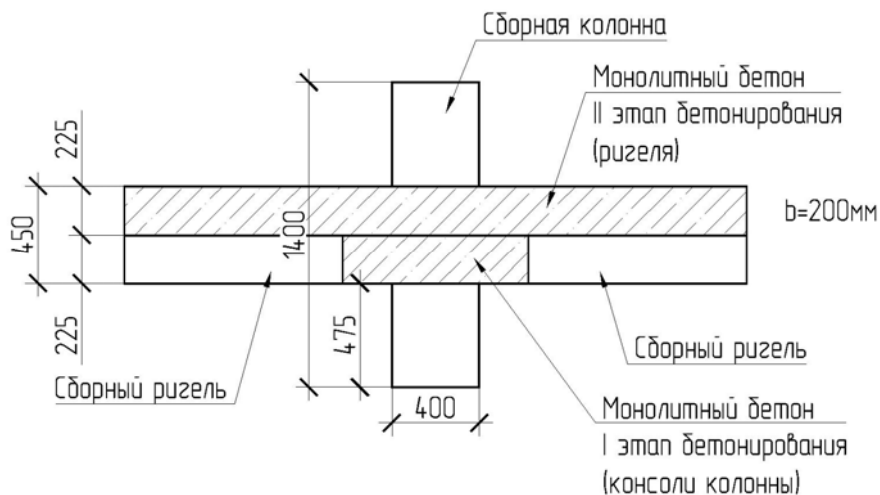
Узлы сборно-монолитного каркаса «колонна – ригель – плита» являются монолитными, с устройством скрытой консоли колонны в пазах ригелей [3].

Проведенные ранее исследования узловых соединений сборных ригелей с консолями колонн показали, что прочность узлового соединения определяется прочностью сжатых полос бетона [4].

Конструктивное решение и схема приложения нагрузки в опытных образцах приняты с прогнозируемым разрушением узлового соединения «ригель – колонна» по сжатым полосам бетона.

Опалубочный чертеж и схема приложения нагрузки показаны на рис. 1.

а



б

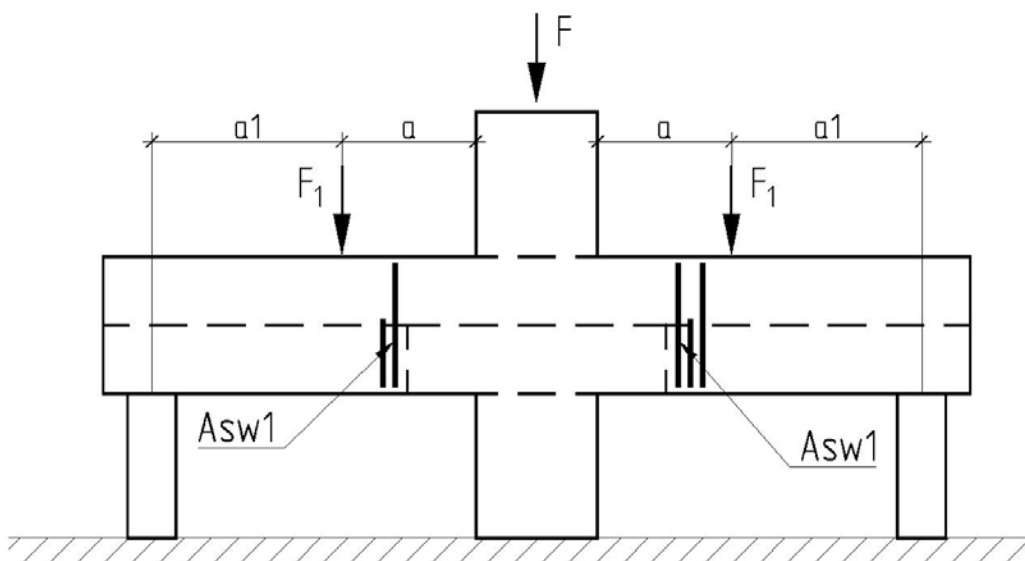


Рис. 1. Сборно-монолитный узел:
а – опалубочный чертеж; б – схема армирования и приложения нагрузки

В исследованиях оценивалось напряженно-деформированное состояние приопорного участка сопряжения ригеля с колонной с соотношением $a/h_{01} = 0,9; 1,5; 2,5$ (a – расстояние от оси действия сосредоточенной силы до центра скрытой консоли колонны, h_{01} – расчетная высота монолитной части балки) и двумя вариантами армирования приопорной зоны сборно-монолитного ригеля сосредоточенной поперечной арматурой A_{sw1} .

Высота сборно-монолитного ригеля 450 мм, ширина 200 мм. Сечение составной колонны 400х200 мм. В теле колонны предусмотрен разрыв бетона на высоту сборно-монолитного ригеля. Высота сборного ригеля – 225 мм, длина и высота скрытой консоли колонны принята 225 мм. Бетон сборных и монолитных элементов принят класса В25, арматура – класса А400.

В первой серии (образцы марок УСМ1-1 ÷ УСМ1-3) приопорные зоны ригелей армированы замкнутыми сосредоточенными хомутами на всю высоту сборно-монолитного ригеля и высоту сборной части.

Во второй серии (образцы марок УСМ2-1 ÷ УСМ2-3) установлен дополнительно замкнутый хомут на всю высоту ригеля (рис. 1б). Для обеспечения совместной работы сборно-монолитных элементов узла в сборных ригелях предусмотрены выпуски продольной и поперечной арматуры. При сборке узла элементы ригелей и колонн устанавливались на поддерживающие конструкции, затем выполнялись армирование и бетонирование скрытой консоли колонны, объединяющей два сборных ригеля, и далее – армирование и бетонирование монолитных частей ригелей. На рис. 2 показаны основные этапы изготовления опытных образцов.

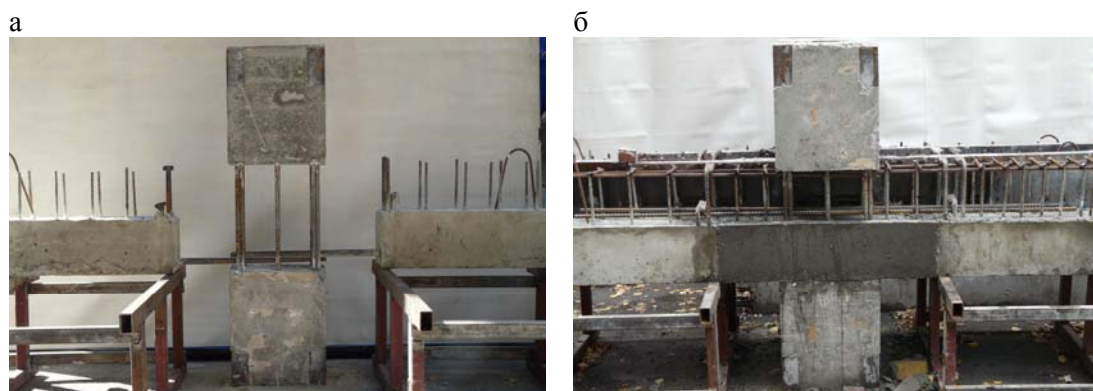


Рис. 2. Основные этапы изготовления опытных образцов:

а – монтаж узла из сборных элементов; б – бетонирование скрытой консоли колонны

Испытание образцов проводилось на лабораторном комплексе для автоматизированных испытаний строительных конструкций с возможностью контроля момента образования и раскрытия трещин методом фотометрии.

Колонна нагружалась нормативной нагрузкой, и поочередно проводилось испытание левых и правых частей сборно-монолитных узлов соединения ригелей с колоннами сосредоточенной нагрузкой при пролетах среза $a/h_{01} = 0,9; 1,5; 2,5$ (см. рис. 1б).

Характер образования трещин показан на рис. 3, 4, схемы разрушения – на рис. 5.

С поэтапным увеличением нагрузки возрастало количество наклонных трещин, равномерно распределенных по высоте приопорной зоны ригеля испытываемых узлов соединения. Следует также отметить образование серий прерывистых трещин, равномерно распределяющихся друг за другом по всей высоте ригеля (включая монолитную скрытую консоль и верхнюю часть ригеля над скрытой консолью), выделяя зону среза. Характерно, что в центральной части узла сопряжения ригеля с колонной трещин не образовывалось на всем протяжении испытаний.

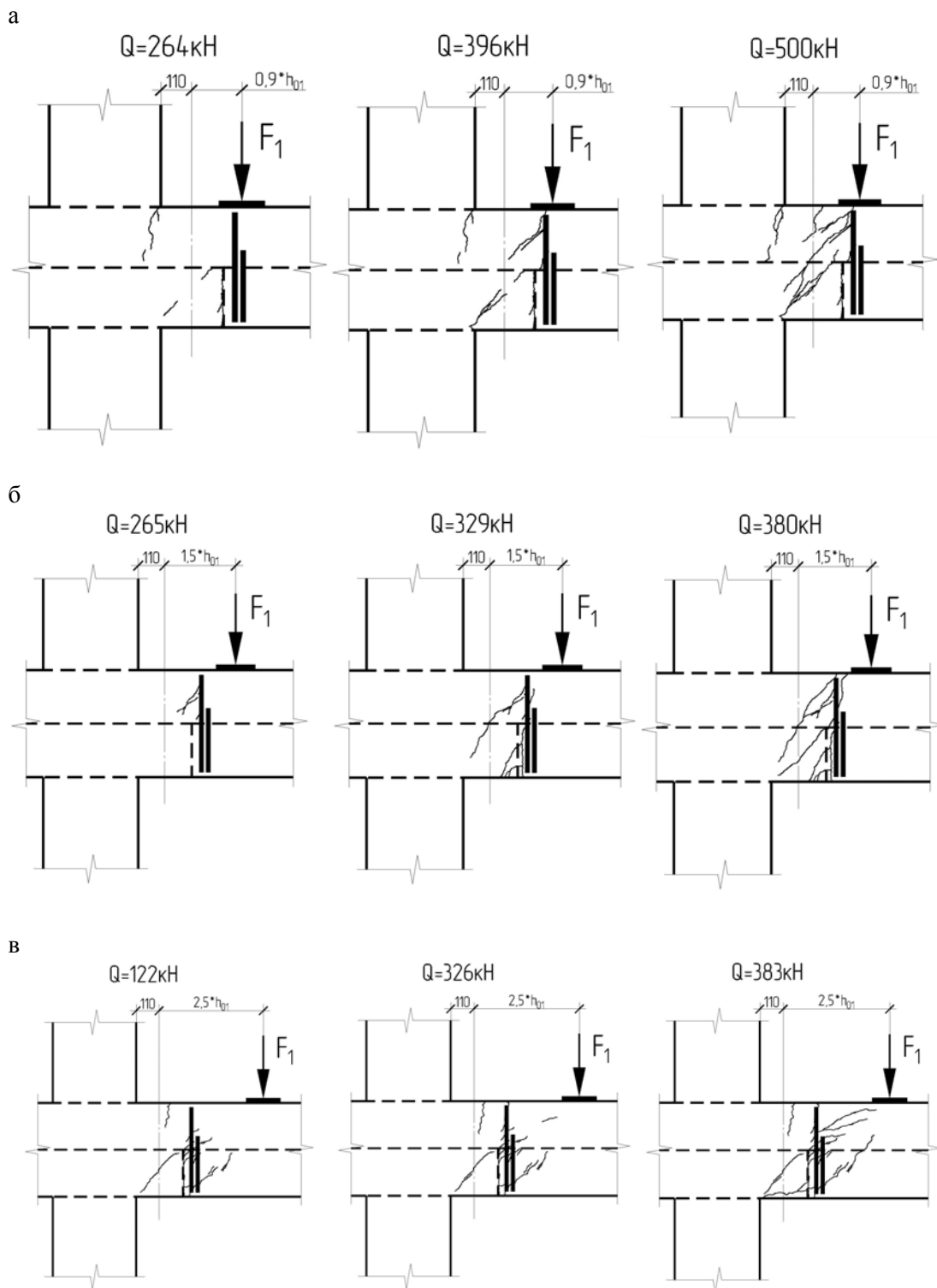
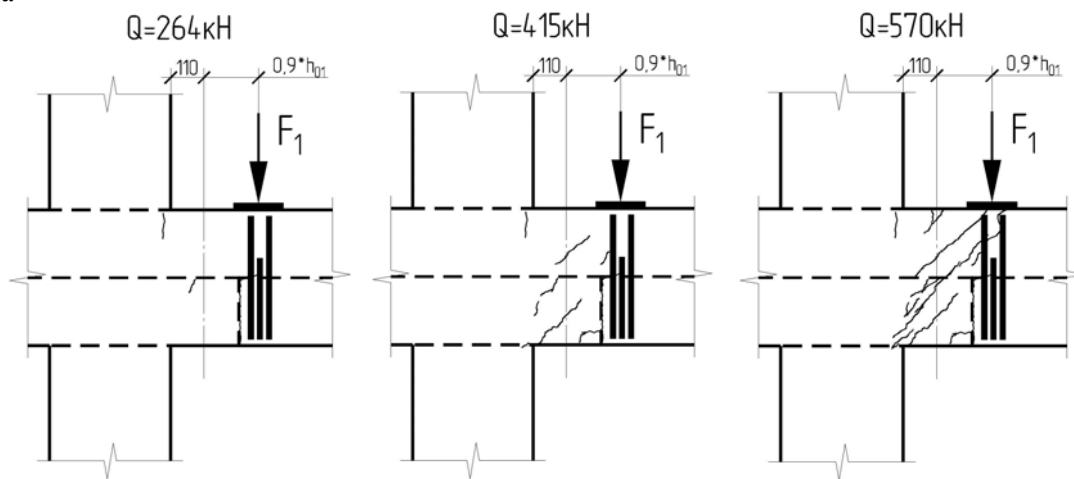
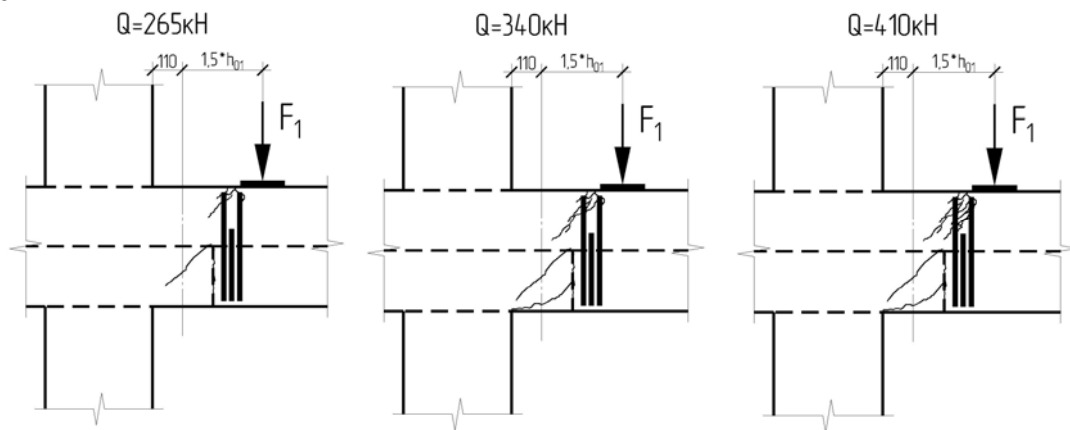


Рис. 3. Образование и развитие трещин образцов марок:
а – УСМ1-1; б – УСМ1-2; в – УСМ1-3

а



б



в

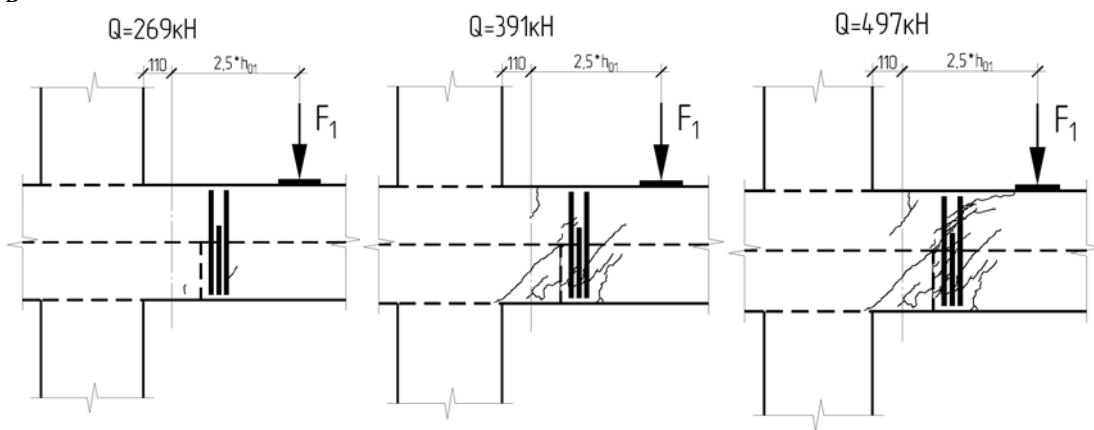


Рис. 4. Образование и развитие трещин образцов марок:
а – УСМ2-1; б – УСМ2-2; в – УСМ2-3

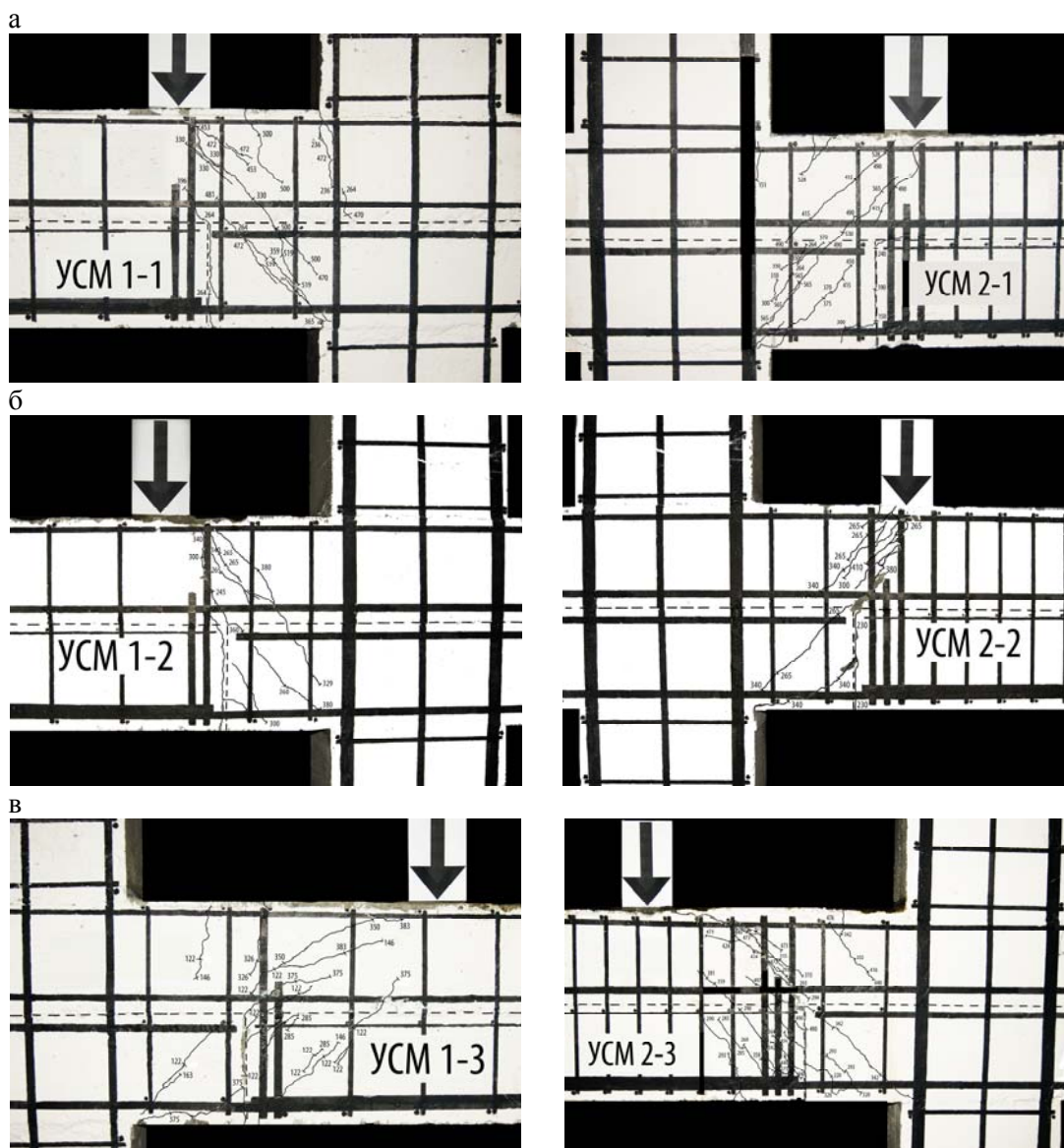


Рис. 5. Схемы разрушения узлового соединения ригеля с колонной при пролетах среза:
 а – $a = 0,9 \cdot h_{01}$; б – $a = 1,5 \cdot h_{01}$; в – $a = 2,5 \cdot h_{01}$

В образце УСМ1-1 формирование сжатой бетонной полосы происходит между условной грузовой опорой, образованной узлом пересечения замкнутого сосредоточенного хомута с продольной арматурой монолитной части ригеля и вертикальным сечением скрытой консоли по грани колонны, с развитием серии наклонных трещин, сконцентрированных вблизи грузовой и опорной площадок. При значении поперечной силы 500 кН внезапно образовалась диагональная трещина внутри сжатой бетонной полосы от края условной грузовой площадки к нижнему входящему углу примыкания ригеля к колонне.

Схема разрушения – диагональный срез внутри сжатой бетонной полосы.

В образце УСМ2-1 формирование сжатой бетонной полосы происходит так же, как и в образце УСМ1-1. Различие заключается в том, что грузовая условная опора имеет большую длину. Условная грузовая площадка формирует сжатую полосу большей ширины с равномерным распределением наклонных трещин по всей полосе с раздроблением бетона скрытой консоли колонны.

Схема разрушения – раздробление бетона в результате сжатия внутри сжатой полосы.

В образце УСМ1-2 сжатая бетонная полоса формируется между грузовой физической площадкой и бетоном скрытой консоли колонны. Наклонные трещины в сжатой бетонной полосе имеют наибольшее раскрытие. При значении поперечной силы 265 кН наступил период образования и развития прерывистых трещин среза монолитной части ригеля вдоль сосредоточенного замкнутого вертикального хомута, установленного на всю высоту сборно-монолитного ригеля.

Схема разрушения – срез бетона монолитной части ригеля вдоль сосредоточенного замкнутого хомута внутри сжатой бетонной полосы.

В образце УСМ2-2 сжатая бетонная полоса формируется в монолитной части ригеля между условной грузовой площадкой, образованной узлом пересечения пакета замкнутых сосредоточенных хомутов с продольной арматурой монолитной части ригеля и верхней частью скрытой консоли колонны. В сжатой бетонной полосе наклонные трещины часто расположены. В местах контакта с бетонной поверхностью скрытой консоли раздробление бетона.

Схема разрушения – раздробление бетона в результате сжатия внутри сжатой полосы.

В образце УСМ1-3 сжатая бетонная полоса формируется в монолитной части ригеля над условной опорной площадкой, образованной узлом пересечения замкнутых сосредоточенных хомутов с продольной арматурой монолитной части ригеля, по направлению к физической грузовой площадке с активным развитием наклонных трещин над угловой грузовой площадкой.

При значении поперечной силы 122 кН наступил период образования и раскрытия прерывистых трещин среза вдоль сосредоточенного замкнутого хомута, установленного на всю высоту сборно-монолитного ригеля.

Схема разрушения – срез бетона по вертикальному сечению монолитной части ригеля вдоль сосредоточенного замкнутого хомута внутри сжатой бетонной полосы.

В образце УСМ2-3 формирование сжатых бетонных полос происходит под условными опорными площадками, образуемыми узлами пересечения сосредоточенных замкнутых хомутов с продольной арматурой сборной и монолитной части ригеля, по направлению к физической грузовой площадке с активным развитием наклонных трещин над верхней условной опорой.

Схема разрушения – срез бетона монолитной части ригеля по граничной трещине вдоль сжатой бетонной полосы между физической грузовой и условной опорной площадками.

В узловых соединениях ригелей с колоннами происходит образование, развитие трещин, схемы разрушения определяются прочностью бетона в сжатых бетонных полосах [5].

Вывод. Разрушение сборно-монолитных узлов можно квалифицировать как разрушение сжатой наклонной полосы бетона опорной части сборно-монолитных ригелей с колоннами в результате достижения главными сжимающими напряжениями предельных значений $\sigma_1 = \gamma_b \cdot R_b$ либо в результате диагонального, продольного или вертикального среза сжатой наклонной полосы бетона, возникающего, когда касательные напряжения достигают предельных растягивающих усилий в бетоне $\tau_b = \gamma_\tau \cdot R_{bt}$.

Полученные в исследованиях схемы разрушения будут использованы в качестве основы для разработки расчетных стержневых моделей сжатых полос бетона сборно-монолитных узлов сопряжения ригелей с колоннами каркасов многоэтажных зданий.

Список литературы

1. Коянкин, А.А. Экспериментальные исследования работы стыкового соединения ригеля с колонной в сборно-монолитном перекрытии / А.А. Коянкин, В.М. Митасов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 5. – С. 27–35.
2. Балдин, И.В. Исследование работы узлов сопряжения колонны и несущих ригелей системы «КУПАСС» / И.В. Балдин, Д.Г. Уткин, С.В. Балдин // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5(52). – С. 72–79.

3. Шембаков, В.А. Сборно-монолитное каркасное домостроение: руководство к принятию решения / В.А. Шембаков. – 2-е изд. – Чебоксары: ООО «Чебоксарская типография №1», 2005. – 119 с.

4. Комаров, В.А. Экспериментальная теория сопротивления ригеля с подрезкой: монография / В.А. Комаров. – М.: Спутник+, 2013. – 199 с.

5. Комаров, В.А. Оценка прочности бетона ригелей с подрезкой многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 4. – С. 6–9.

References

1. Koyankin, A.A. Experimental studies of the work of the butt joint of the cross bar with the column in the precast-monolithic floor / A.A. Koyankin, V.M. Mitsov // Vestnik MGSU. – 2015. – 5. – P. 27–35.

2. Baldin, I.V. Study of the operation of the junction assemblies of the column and bearing beams of the system «KUPASS» / I.V. Baldin, D.G. Utkin, S.V. Baldin/ Vestnik of Tomsk State Architectural and Construction University. – 2015. – 5(52). – P. 72–79.

3. Shembakov, V.A. Precast-monolithic frame building: guide to decision / V.A. Shembakov. – 2nd edition. – Cheboksary: LLC «Cheboksary printing house 1», 2005. – 119 p.

4. Komarov, V.A. Experimental theory of the resistance of the rig with trimming: monograph / V.A. Komarov. – M.: Sputnik+, 2013. – 199 p.

5. Komarov, V.A. Evaluation of concrete strength of the railings with trimming of multi-storey frameworks / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Construction mechanics and calculation of structures. – 2016. – №4. – P. 6–9.

УДК 624.011.1

DOI 10.54734/20722958_2023_3_144

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Арискин Максим Васильевич**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru**Залилов Илья Вадимович**,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Ariskin Maksim Vasilievich**,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department « Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru**Zalilov Ilya Vadimovich**,
Postgraduate of the department «Building
Structures»
E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ ШАЙБ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М.В. Арискин, И.В. Залилов

Соединения элементов современных деревянных конструкций в значительной степени включают в себя использование механических рабочих связей. Передача через них усилий приводит, помимо основной работы на смятие, к более опасной хрупкой работе древесины на скалывание и раскалывание, что сказывается на обеспечении надежности соединений и всей конструкции. Повышение надежности узловых соединений в современных деревянных конструкциях достигается за счет применения различного рода вкладышей, которые впрессовываются, вкладываются или клеиваются в древесину соединяемых элементов и тем самым обеспечивают передачу усилий от одного элемента к другому. Соединения на клеиваемых шайбах позволяют на относительно малой площади взаимного контакта передать значительные усилия, что обусловлено их высокой несущей способностью. Чаще всего такие вкладыши выполняются металлическими (шпонки, шайбы, нагели и т.п.). Вклеивание стальных шайб в местах повышенной концентрации напряжений при передаче усилий позволяет перераспределить напряжения смятия/скалывания на более значительную площадь соединяемых деталей. Обладая достаточно высокой несущей способностью, стальные шайбы имеют существенный недостаток, а именно высокую степень коррозии, что вызывает необходимость проведения дополнительных работ по защите металлических деталей от коррозии или замене материала на композитный. В данном случае это композитные пластики REC Formax и REC Friction.

Предложено коррозионно-стойкое соединение с применением клеенных пластиковых шайб. Рассмотрена технология изготовления пластиковых шайб с применением 3D-печати. Представлены методика проведения и результаты контрольных испытаний образцов. Выполнен анализ результатов испытаний.

Ключевые слова: аддитивные технологии, деревянные конструкции, соединение, шайба, пластик

ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR MAKING WASHERS OF WOODEN STRUCTURE CONNECTIONS

М.В. Арискин, И.В. Залилов

Modern wooden structures largely involve the use of joints. Transferring the structural loads through them leads to wood crushing and also to the more dangerous fragile work of wood for cracking and splitting, which affects the reliability of connections and the entire structure. Increasing

reliability of joints in modern wooden structures is achieved by the use of various kinds of shear plates, which are pressed, inserted or glued into the wood of the joined elements and ensure the transfer of loads from one element to another. The joints with glued washers allow a relatively small bearing area to transfer significant forces due to their significant bearing capacity. Mostly, inserts are made of metal (keys, washers, drift pins, etc.). Gluing steel washers at stress concentrations locations make it possible to distribute forces over a larger area. Having a sufficiently high bearing capacity, steel washers have a significant disadvantage – a high degree of corrosion, which leads to additional work to protect metal parts from corrosion or replace the material with a composite. REC Formax and REC Friction composite plastics are used.

Corrosion-resistant connection using of glued plastic washers is proposed. Technology of making plastic washers using 3D printing is presented. Technique and results of control tests of samples are presented. Analysis of test results is performed.

Keywords: additive technologies, wooden structures, connection, washer plastic

Введение

Узловые соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических связей, таких, как вклеенные стержни, металлические зубчатые пластины, вклеенные плоские стержни, кольцевые шпонки, стальные шайбы [1-7] и др., которые вклеиваются или впрессовываются в деревянные элементы, тем самым обеспечивают передачу усилий от одного элемента другому. Обладая достаточно высокой несущей способностью, металлические рабочие вкладыши в процессе эксплуатации могут подвергаться коррозии, что вызывает необходимость проведения антикоррозионных мероприятий как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

На основе достоинств соединений на вклеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8] предлагается коррозионно-стойкое соединение деревянных конструкций с применением вклеенных пластиковых шайб. В основу предлагаемого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи. При этом вклеенные шайбы выполняются из коррозионно-стойкого материала.

Главное отличие предлагаемого соединения от соединения на вклеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8] заключается в применении аддитивных технологий для изготовления пластиковых шайб. Применение данной технологии позволяет моделировать и изготавливать шайбы с различными параметрами (диаметр, толщина, внутреннее отверстие) и характеристиками.

Необходимо провести контрольные испытания образцов на вклеенных пластиковых шайбах для установления перспективности использования в соединениях деревянных конструкций.

Далее представлены технология изготовления шайб из пластиков REC formax и REC friction с применением 3D-печати, методика проведения, результаты и анализ контрольных испытаний образцов.

Технология изготовления пластиковых шайб

В качестве материала шайб приняты пластики REC formax (АБС-пластик с содержанием углеродных волокон (15 %)) и REC friction (полиамид 12 с добавлением стекловолокон (12 %)).

Изготовление шайб производится на 3D-принтере Picaso Designer X PRO с технологией печати Fused filament fabrication (FFF) и выполняется в следующей последовательности:

- создание 3D-модели шайбы в программе Fusion 360;
- подготовка модели в программе Polygon X (задаются параметры печати: толщина слоя, заполнение и т.д.);
- загрузка файла в принтер;
- заправка пластика;

- калибровка стола перед печатью;
- нанесение клея для повышения адгезии пластика к стеклянному столу;
- выбор файла для печати, выбор материала и скорости печати;
- печать шайбы (рис. 1);
- снятие готовой модели.



Рис. 1. Печать шайб на 3D-принтере Picaso Designer X PRO

При подготовке и печати шайб необходимо отметить следующие аспекты:

- для максимальной прочности и однородности при подготовке модели для печати использовались следующие настройки: 100 % заполнение, повторяющее контур модели, толщина слоя 0,1 мм;
- непосредственно перед печатью необходимо произвести сушку пластика ввиду его высокой гигроскопичности (>6 часов при температуре 75°C);
- при печати шайб целесообразно использовать стальное сопло.

Методика проведения испытаний

Изготовление образцов с применением вклеенных пластиковых шайб выполняется аналогично изготовлению образцов на вклеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8].

В деревянном элементе из сосны 2-го сорта размером $a \times b \times c$ выполняются гнездо под шайбу и сквозное отверстие под стяжной болт. Выборка гнезда в деревянном элементе осуществляется фрезой фирмы «Protool» с центровочным сверлом на стационарном сверлильном станке. Диаметр гнезда на 1-2 мм больше диаметра шайбы. Глубина гнезда принимается равной толщине шайбы, так, чтобы внешние плоскости шайбы и соединяемого элемента были в одном уровне. Центральное сквозное отверстие рассверливается под стяжной болт диаметром на 1-2 мм больше, чем диаметр стяжного болта. Это обусловлено тем, что болт не должен упираться в древесину, тем самым создавая в ней дополнительные напряжения. Всё усилие, приходящееся на болт, должно передаваться на вклеенную шайбу.

Пластиковые шайбы вкладываются в гнезда деревянных элементов, предварительно заполненные эпоксидным клеем на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Излишки клея убираются, после чего деревянный элемент с вклеенными шайбами подвергается выдержке (2-3 дня) до полного отверждения клея.

Клеевая композиция, заполняющая гнездо, после отверждения создает монолитное соединение с шайбой и, кроме того, способствует уплотнению поверхности древесины

по периметру с шайбой. Шайба в этом случае начинает работать не только на скалывание клеевого шва по поверхности, но и на смятие древесины по контуру шайбы. Все это, как показывают испытания, существенно увеличивает несущую способность и жесткость такого соединения.

Форма и размер деревянного элемента приняты с соблюдением шага расстановки шайб S_1 и S_3 . В качестве основного образца взят дощатый элемент с размерами (a, b, c). Диаметр шайб ($D_{ш}$) равен 60 мм, толщина ($t_{ш}$) – 10 мм. Размеры деревянного элемента и параметры расстановки шайб приняты по аналогии с образцами на клеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8].

Для проведения контрольных испытаний изготовлены образцы с клееными шайбами из пластика REC formax (образец 1) и REC friction (образец 2) (рис. 2, а). Основные параметры испытываемых образцов показаны на рис. 2, б.

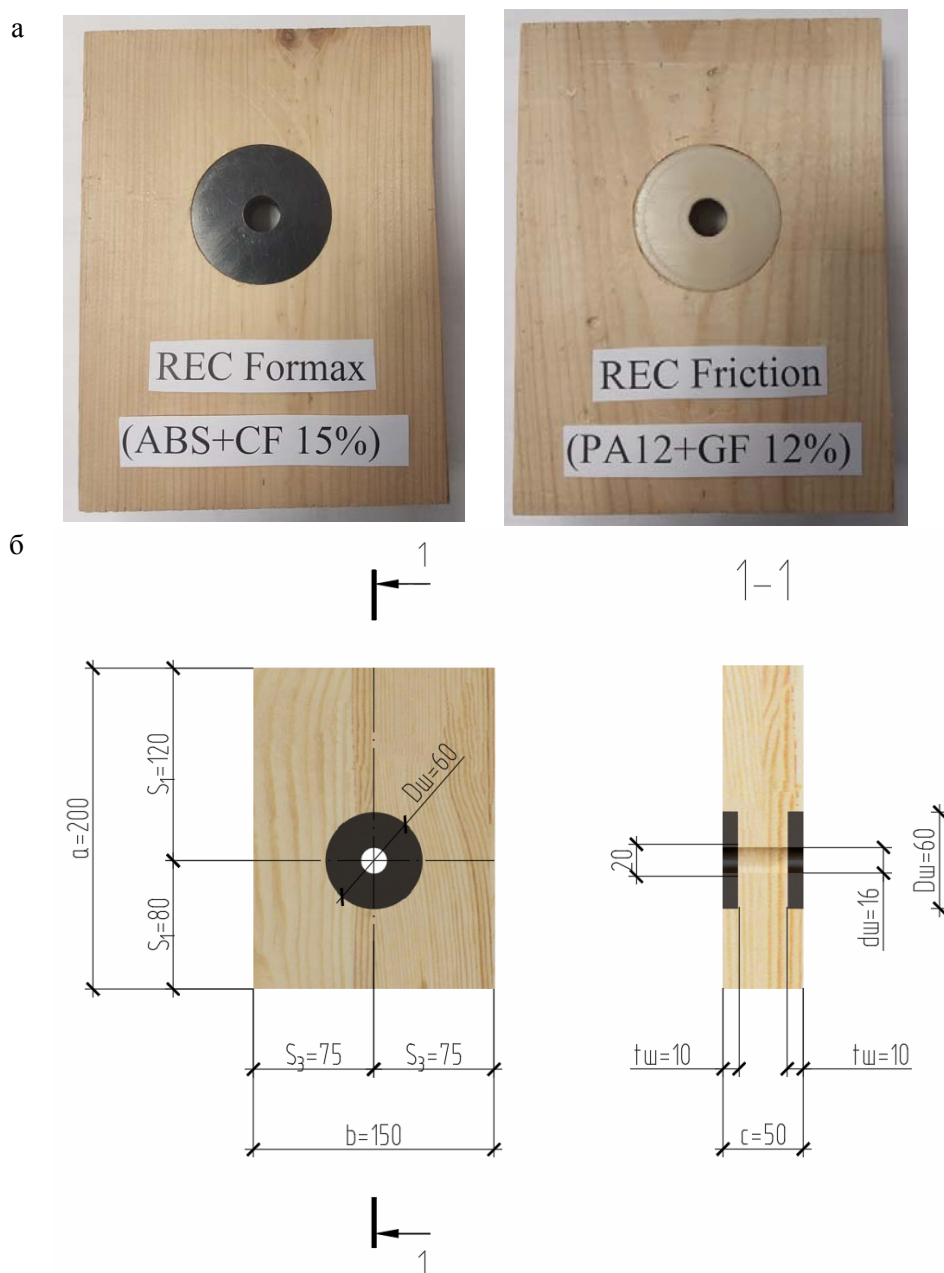


Рис. 2. Образцы на клеенных стеклопластиковых шайбах:
а – общий вид образцов; б – размеры образца

Согласно результатам испытаний образцов на клеенных стальных и стеклопластиковых шайбах, было отмечено, что величины разрушающих нагрузок для трехсоставных и односоставных образцов, испытанных через металлическую раму, имитирующую металлические накладки, различаются незначительно [6, 8, 9]. На этом основании для нагружения деревянного элемента с клееными пластиковыми шайбами будем использовать металлические накладки (МН) (рис. 3, а).

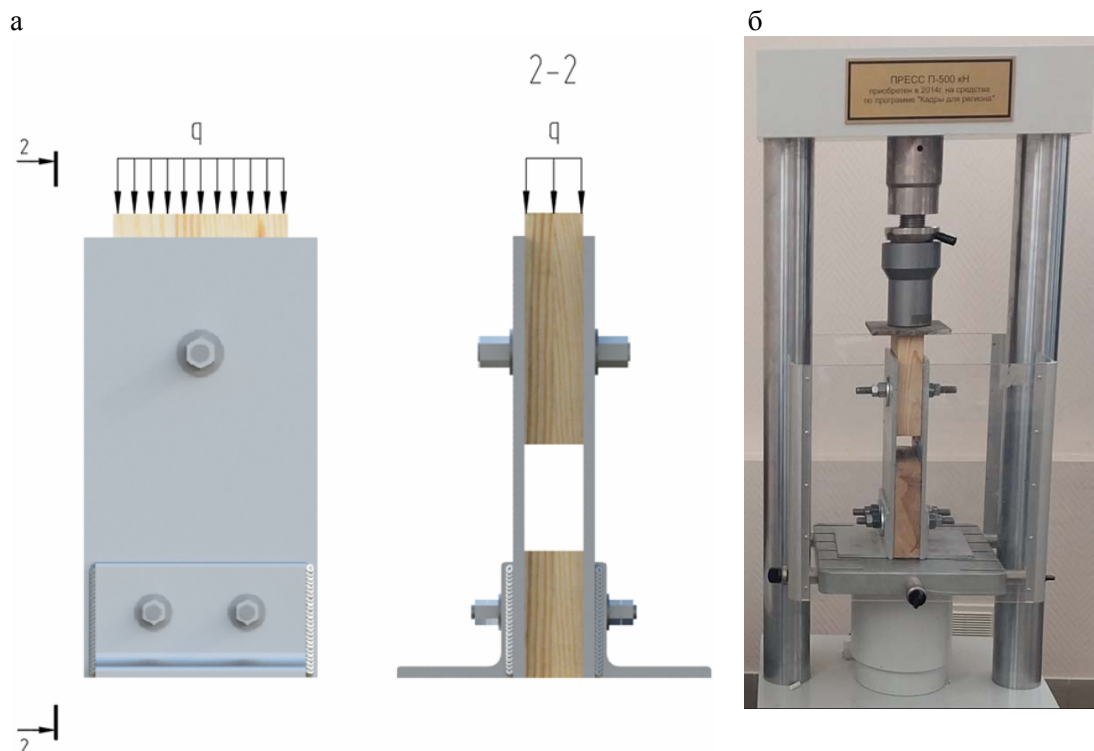


Рис. 3. Испытание образцов, изготовленных с применением шайб из пластика RECformax и RECfriction:

а – схема нагружения образца через металлические накладки;
б – образец в гидравлическом прессе П-500

Испытания проводились при нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. при температуре 20-22°C и влажности воздуха 60-65 %. Образцы испытывались на сжатие на гидравлическом прессе П-500 с максимальной нагрузкой 500 кН (рис. 3, б). На основе результатов ранее проведенных испытаний образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами [8, 9] передача нагрузки на исследуемые образцы осуществлялась непрерывно со скоростью нагружения 2 кН/мин. Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией начального и конечного времени. В процессе испытаний осуществлялся осмотр образцов. Результаты заносятся в журнал испытаний. На начальном этапе производилось нагружение образца до 15 кН для обжатия шайб и исключения появления рыхлых деформаций. После чего образцы нагружались до полного разрушения.

Результаты испытаний

Испытания проводились до полного разрушения образцов. Разрушающая нагрузка ($P_{\text{разр}}$) образца 1 составила 65,0 кН, для образца 2 – 68,74 кН. График нарастания деформаций сдвига представлен на рис. 4. Как видно из графика, деформации в образце 1 возникают при нагрузке 15,86 кН, в образце 2 – при нагрузке 10,08 кН. При дальнейшем нагружении наблюдается рост деформаций: образец 1 – при нагрузке 28,16 кН перемещения составили 0,43 мм, образец 2 – при нагрузке 43,10 кН перемещения составили 2,63 мм, что можно считать упругой работой пластиковых шайб. После чего мы наблюдаем перегиб на графике – происходит смятие шайб, и в

работу включается древесина, что было отмечено при испытаниях (резкий треск в образцах). Очевидно, это связано с пониженными значениями прочности и модуля упругости пластиков. Далее наблюдаем значительный рост деформаций при увеличении нагрузки до полного разрушения образцов.

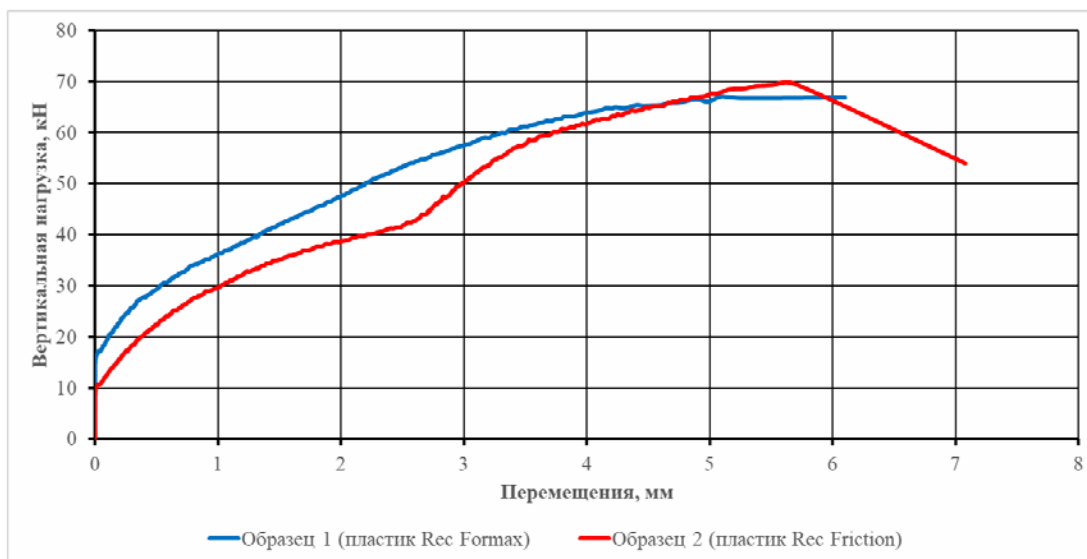


Рис. 4. Деформации сдвига в образцах

Общий вид разрушения образцов представлен на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид разрушения образцов

По общему виду разрушения образцов видно, что при передаче усилия с центрального болта происходит смятие пластиковых шайб, после чего в работу включается деревянный элемент. Общее разрушение образца сопровождается раскалыванием деревянного элемента вдоль линии действия усилия.

Следует отметить слабую адгезию пластиковых шайб в гнезде деревянного элемента. Это объясняется гладкой поверхностью внутренней части шайб. В результате чего не была обеспечена в полной мере совместная работа шайб и древесины. В связи с чем для сцепления шайбы и древесины при изготовлении на внутреннюю часть шайб будет наноситься выпуклая сетка.

Выводы

1. Предложено коррозионно-стойкое соединение деревянных конструкций с использованием вклеенных пластиковых шайб. Пластиковые шайбы выполняются с при-

менением 3D-печати. Технология изготовления данного соединения аналогична изготовлению соединений на клеенных стальных и стеклопластиковых шайбах.

2. Применение аддитивных технологий позволяет моделировать и изготавливать пластиковые шайбы с различными параметрами и характеристиками.

3. На основании результатов контрольных испытаний образцов установлено, что при нагружении происходит смятие пластиковых шайб, после чего в работу включается древесина, что объясняется пониженными прочностными характеристиками пластика.

4. Установлена удовлетворительная несущая способность пластиковых шайб, что говорит о перспективности дальнейшего исследования предлагаемого соединения.

5. Для продолжения исследования предложенного соединения необходимо изготовить пластиковые шайбы с шероховатой внутренней поверхностью для обеспечения монолитной работы соединения и провести дополнительные испытания образцов.

Список литературы

1. Турковский, С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
2. Федосов, С.В. Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, А.А. Актуганов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 11–12 (659–660). – С. 39–43.
3. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.
4. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9–15.
5. Вдовин, В.М. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 171 с.
6. Вдовин, В.М. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
7. Ишмаева, Д.Д. Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах / Д.Д. Ишмаева, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 189–195.
8. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
9. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.

References

1. Turkosky, S.B. Glued wooden constructions with nodes on the pasted rods in the modern construction (TsNIISK system) / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. – Moscow: RIF «Building Materials», 2013. – 308 p.
2. Fedosov, S.V. Industrial wood constructions on metal gear plate / S.V. Fedosov, V.G. Kotlov, A.A. Aktuganov // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No11–12 (659–660). – P. 39–43.
3. Rudnev, I.V. Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk, 2014. – No4. – P. 5–12.

4. Lisitsky, I.I. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov // Industrial and civil engineering. – 2020. – No4. – P. 9–15.
5. Vdovin, V.M. Ring dowel glued in timber structures joints / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Halachov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 171 p.
6. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.
7. Ishmaeva, D.D. Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers / D.D. Ishmaeva, V.M. Vdovin // Bulletin of Orenburg State University. – 2014. – No1. – P. 189–195.
8. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.
9. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2023_3_152

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Тюменский индустриальный университет
Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Белова Лариса Владимировна,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Начертательная геометрия и графика»,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: belovalv@tyuiu.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Industrial University of Tyumen
Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Belova Larisa Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics», Professor of the department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: belovalv@tyuiu.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОЙ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕЛКОПУЗЫРЧАТОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований процесса работы мелкопузырчатой пневматической системы аэрации – аэротенка. Разработана методика расчета величины основного технологического показателя системы пневматической системы аэрации – удельной окислительной способности. Использование полученной методики расчета позволит оптимизировать процессы расчета и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод.

Ключевые слова: система аэрации, коэффициент массопередачи, окислительная способность, площадь контакта фаз, интенсивность аэрации, аэрационный бассейн

METHOD OF CALCULATING THE VALUE OF SPECIFIC OXIDIZING CAPACITY OF A FINE-BUBBLED PNEUMATIC AERATION SYSTEM

S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the process of operation of a fine-bubbled pneumatic aeration system – aeration tank are presented. A method for calculating the value of the main technological indicator of the pneumatic aeration system – the specific oxidizing ability has been developed. The use of the obtained calculation methodology will optimize the processes of calculation and operation of biological wastewater treatment facilities.

Keywords: aeration system, mass transfer coefficient, oxidizing ability, phase contact area, aeration intensity, aeration pool

На канализационных очистных сооружениях многих городов мира в качестве основного метода обезвреживания сточных вод используется метод аэробного окисления загрязнений микроорганизмами активного ила аэротенков. Наиболее энергоемким элементом канализационных очистных сооружений, на который приходится более 50 % всех эксплуатационных затрат на процесс биологической очистки сточных вод, является система пневматической аэрации. Система пневматической аэрации определяет величину концентрации растворенного кислорода в иловой смеси и степень интенсивности ее перемешивания в аэрационном бассейне, она в значительной степени влияет на величину эффекта биологической очистки сточных вод в аэротенках.

Пневматическая система аэрации осуществляет подачу сжатого воздуха от компрессоров и воздуходувок под определенным давлением по магистральным и распределительным трубопроводам в диспергирующие воздух аэраторы, расположенные в соответствующих точках аэротенка.

Первые образцы простейших среднепузырчатых аэраторов, представляющих собой перфорированные трубы, были созданы в начале XX века [1]. В 1913 году английской фирмой «Джон Атвуд» был получен патент на мелкопузырчатый аэратор, представляющий собой мелкопористую пластину [1]. Экспериментальные исследования, проведенные в 1923 г. Комбосом, позволили установить, что для улучшения процесса аэрации иловой смеси целесообразно использовать спиральную циркуляцию жидкости в аэрационном объеме, которая реализуется посредством монтажа пневматических аэраторов вдоль длинной стороны коридорного аэротенка.

Впоследствии этот принцип расположения пневматических аэраторов в аэрационном объеме был использован при строительстве аэротенков на крупнейших канализационных очистных сооружениях США, Англии и Канады [1]. Особенности конструкции этих аэротенков и опыт их эксплуатации были проанализированы Хердом в своих трудах, которые вышли в 1921-1925 гг. и в которых были сформулированы рекомендации, согласно которым пневматические аэраторы надлежит укладывать на дне аэротенка по три–пять рядов вдоль длинной его стенки таким образом, чтобы они занимали около трети площади днища аэротенка.

Сложившаяся в начале 20-х годов XX века конструкция коридорного аэротенка-вытеснителя (конструкция Херда) почти не подвергалась изменениям до наших дней, и в настоящее время она является основой для создания сооружений биологической очистки станций аэрации многих городов и промышленных предприятий.

В настоящее время в технологических процессах биологической очистки сточных вод аэробными микроорганизмами активного ила в аэротенках широкое распространение получили среднепузырчатые и мелкопузырчатые пневматические аэраторы.

Среднепузырчатые аэраторы представляют собой трубопроводы с отверстиями 1–4 мм, которые позволяют сформировать в аэрационном объеме пузырьки воздуха диаметром 5–12 мм. Среднепузырчатые аэраторы в отличие от мелкопузырчатых аэраторов были более надежны в работе. В них в значительно меньшей степени происходит постепенное закупоривание воздухопроводящих отверстий, и вследствие этого не наблюдается увеличение гидравлического сопротивления.

Мелкопузырчатые аэраторы позволяют получить пузырьки воздуха диаметром 2–5 мм, и вследствие этого они обладают большей эффективностью, чем среднепузырчатые аэраторы. Пузырьки воздуха в процессе работы мелкопузырчатого аэратора

формируются в процессе пропускания сжатого воздуха через пористые керамические, пластмассовые или тканевые диспергирующие поверхности, имеющие размеры пор 0,08–0,2 мм. При уменьшении размеров пор диспергирующей поверхности аэратора уменьшается и диаметр образующихся пузырьков воздуха. При диаметре пор диспергирующей поверхности мелкопузырчатого пневматического аэратора 0,08–0,1 мм резко возрастает его гидравлическое сопротивление и проявляется эффект закупоривания пор диспергирующей поверхности.

В настоящее время широкое распространение в процессах биологической очистки получили мелкопузырчатые пневматические аэраторы, имеющие диспергирующую поверхность, выполненную в виде трубки, диска или фильтросной пластины с размерами пор 0,1–0,2 мм.

На рис. 1 представлены общий вид трубчатого аэратора из пористого полиэтилена ХКП-600 (Финляндия) и график зависимости среднего диаметра образующихся пузырьков d_{cp} , мм, от величины расхода воздуха, пропускаемого через аэратор.

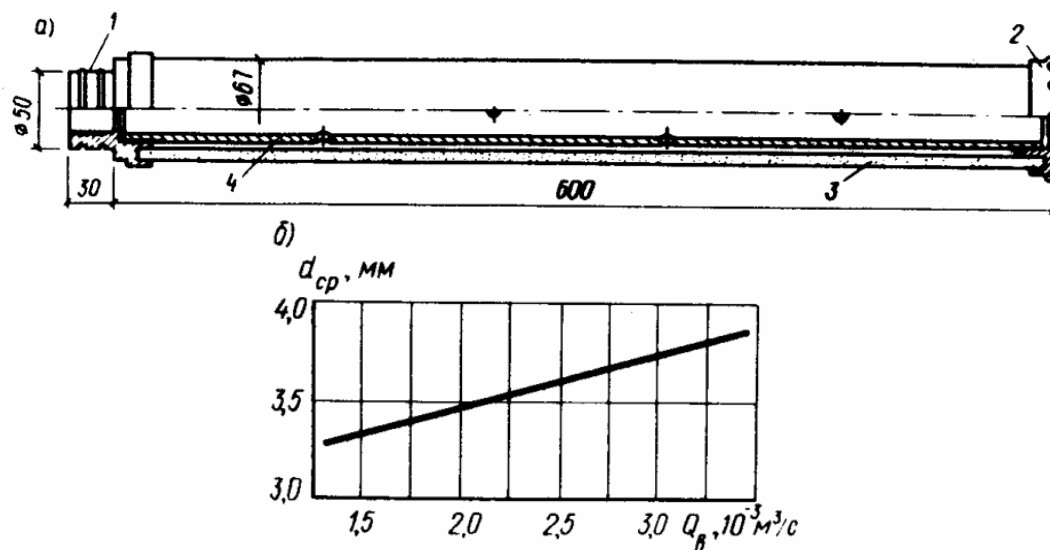


Рис. 1. Трубчатый аэратор ХКП-600:

а – общий вид аэратора: 1 – штуцер; 2 – заглушка; 3 – пористая труба;
4 – металлическая перфорированная труба;

б – график зависимости среднего диаметра пузырьков $d_{п}$, м, от величины расхода воздуха, пропускаемого через аэратор ХБК-600

На рис. 2 приведены общий вид дискового аэратора из пористого полиэтилена ХКЛ-210 (Финляндия) и график зависимости величины среднего диаметра образующихся пузырьков d_{cp} , мм, от расхода воздуха, пропускаемого через аэратор.

В работе [2] приводится график зависимости величины коэффициента использования кислорода воздуха $K_{и}$ от расхода сжатого воздуха $Q_{в}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, подаваемого в мелкопузырчатый пневматический аэратор с резиновой мембраной, погруженный на глубину $H_a=3$ м (рис. 3).

Данные, представленные на рис. 3, подтверждают вывод о том, что при увеличении расхода сжатого воздуха, подаваемого в аэратор $Q_{в}$, величина коэффициента используемого кислорода воздуха $K_{и}$ снижается вследствие повышения среднего диаметра образующихся пузырьков $d_{п}$, м, и уменьшения величины удельной площади контакта раздела фаз “воздух – вода” A_y , $\text{м}^2/\text{м}^3$.

В соответствии с экспериментальными данными (см. рис. 3), при величине интенсивности аэрации $I=10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ величина коэффициента использования кислорода воздуха имела значение $K_{и}=0,2$.

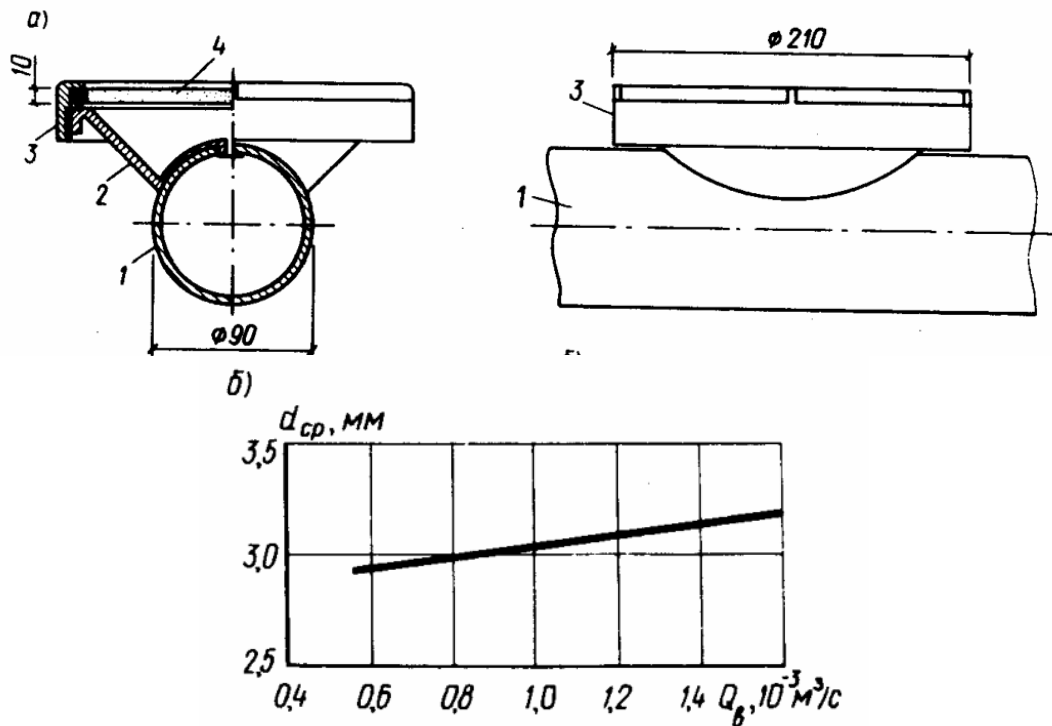


Рис. 2. Дисковый аэратор ХКЛ-210:

а – общий вид аэратора: 1 – воздухопровод; 2 – пластмассовый корпус; 3 – зажимное кольцо; 4 – пористая пластина;

б – график зависимости среднего диаметра пузырьков d_{cp} , м, от величины расхода воздуха, пропускаемого через аэратор ХКЛ-210

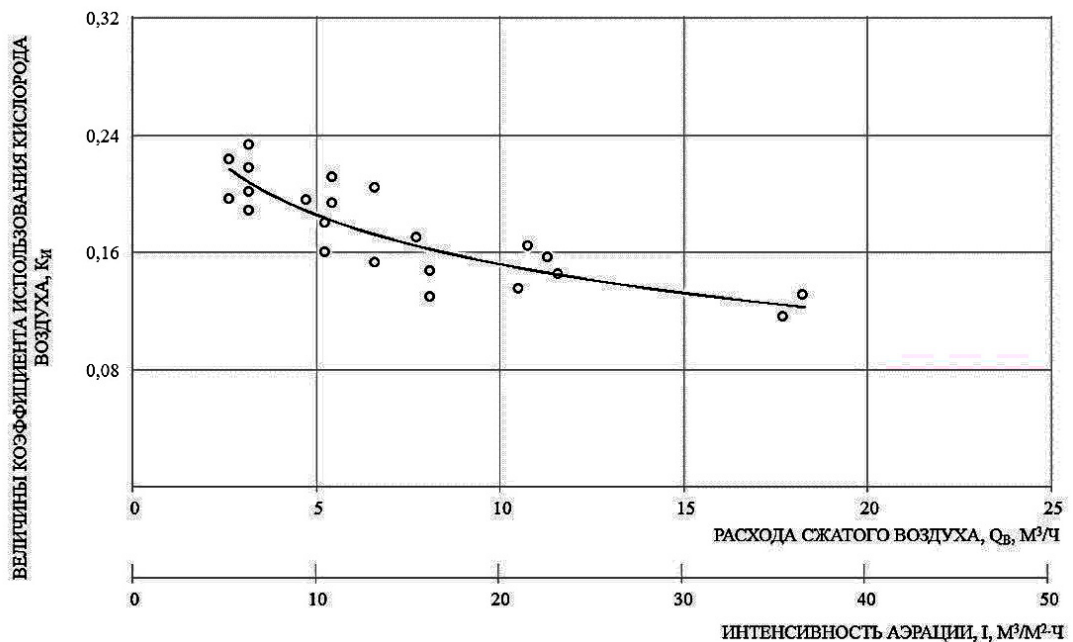


Рис. 3. График зависимости величины коэффициента использования кислорода воздуха $K_{и}$ от расхода сжатого воздуха Q_b , $\text{m}^3/\text{ч}$, подаваемого в мелкопузырчатый аэратор, погруженный на глубину $H_a=3$ м, и интенсивности аэрации I , $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{ч})$

В этом случае величина удельной окислительной способности пневматического аэратора может быть определена по формуле

$$OC_y = Q_{\text{ВУ}} \cdot C_{\text{КВ}} \cdot K_{\text{и}} = \frac{I}{H_a} \cdot C_{\text{КВ}} \cdot K_{\text{и}} = \frac{10}{3} \cdot 0,28 \cdot 0,2 = 0,19 \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ВУ}} = \frac{I}{H_a}$ – удельный расход сжатого воздуха, подаваемого на пневматический аэратор, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$; $C_{\text{КВ}} = 0,28 \text{ кг/м}^3$ – концентрация кислорода в воздухе, подаваемом на пневматический аэратор.

Также можно записать:

$$OC_y = K_w \cdot C_{\text{н}} = 3600 \cdot K_L \cdot A_y \cdot C_{\text{н}} = 3600 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D \cdot V_{\text{н}}}{\pi \cdot d_{\text{н}}}} \cdot A_y \cdot C_{\text{н}}, \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (2)$$

где $C_{\text{н}}$ – концентрация насыщения воды кислородом воздуха, кг/м^3 ; K_L – коэффициент массопередачи границы раздела фаз, м/с ,

$$K_L = \sqrt{\frac{4 \cdot D \cdot V_{\text{н}}}{\pi \cdot d_{\text{н}}}}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где D – коэффициент нестационарной молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; $d_{\text{н}}$ – диаметр пузырька воздуха, м ; $V_{\text{н}}$ – скорость всплывания в воде пузырька воздуха, м/с .

Величина удельной площади поверхности межфазового контакта в аэрационном бассейне может быть определена по формуле

$$\begin{aligned} A_y &= n_{\text{н}} \cdot f_{\text{н}} = \frac{W_{\text{ВУ}}}{W_{\text{н}}} \cdot f_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{ВУ}} \cdot T_{\text{н}}}{3600 \cdot W_{\text{н}}} \cdot f_{\text{н}} = \frac{I \cdot T_{\text{н}}}{3600 \cdot H_a \cdot W_{\text{н}}} \cdot f_{\text{н}} = \\ &= \frac{I \cdot T_{\text{н}}}{3600 \cdot H_a \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{н}}^3}{6}} \cdot \pi \cdot d_{\text{н}}^2 = \frac{6 \cdot I \cdot T_{\text{н}}}{3600 \cdot H_a \cdot d_{\text{н}}}, \text{ м}^2 / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $n_{\text{н}}$ – число пузырьков воздуха в единице аэрационного объема, шт.; $f_{\text{н}} = \pi \cdot d_{\text{н}}^2$ – площадь поверхности эквивалентного пузырька строго сферической формы, м^2 ; $W_{\text{ВУ}}$ – объем, занимаемый воздухом в единице объема водовоздушной смеси, м^3 ;

$W_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{н}}^3}{6}$ – объем эквивалентного пузырька сферической формы, м^3 ;

$T_{\text{н}}$ – продолжительность всплывания пузырька воздуха в аэрационном объеме, с.

При средней величине эквивалентного диаметра пузырьков воздуха, образующихся в аэрационном объеме в процессе работы мелкопузырчатого аэратора, $d_{\text{н}} = 0,003 \text{ м}$ величина скорости его всплывания в воде может быть вычислена по формуле, приведенной в [1]:

$$V_{\text{н}} = 0,0327 \cdot d_{\text{н}}^{-0,360} = 0,0327 \cdot 0,003^{-0,360} = 0,26 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Продолжительность группового всплывания пузырьков воздуха в аэрационном объеме (продолжительность контакта фаз) с учетом возникновения эрлифтного эффекта может быть определена по формуле

$$T_{\text{н}} = \frac{H_a}{V_{\text{н}}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} \cdot K_I = \frac{3}{0,26} \cdot 3^{-0,333} \cdot 1 \cdot 1,757 \cdot 10^{-0,35} = 6,3 \text{ с}, \quad (6)$$

где $K_n = H_a^{-0,333}$ – коэффициент, учитывающий влияние глубины слоя жидкости над аэратором; $K_b = 1$ – коэффициент, учитывающий влияние размеров относительной ширины зоны аэрации в аэрационном бассейне; $K_l = 1,757 \cdot I^{-0,35}$ – коэффициент, учитывающий влияние величины интенсивности аэрации.

Величина насыщения воды кислородом воздуха при глубине погружения аэратора $H_a = 3,0$ м может быть найдена по формуле, приведенной в СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения»:

$$C_n = \left(1 + \frac{H_a}{20,6}\right) \cdot C_T = \left(1 + \frac{3}{20,6}\right) \cdot 0,009 = 0,01 \text{ кг/м}^3, \quad (7)$$

где $C_T = 0,09 \text{ кг/м}^3$ – растворимость кислорода воздуха в воде при нормальном давлении и температуре $t = 20^\circ\text{C}$.

В соответствии с формулой (4) величина площади поверхности контакта фаз в аэрационном бассейне будет иметь следующее значение:

$$A_y = \frac{6 \cdot I \cdot T_n}{3600 \cdot H_a \cdot d_n} = \frac{6 \cdot 10 \cdot 6,3}{3600 \cdot 3 \cdot 0,003} = 11,7 \text{ м}^2 / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}). \quad (8)$$

В соответствии с формулами (1) и (2) имеем

$$OC_y = 3600 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D_{\text{нд}} \cdot V_n}{\pi \cdot d_n}} \cdot A_y \cdot C_n = Q_{\text{вв}} \cdot C_{\text{кв}} \cdot K_n, \text{ кг/}(\text{м}^3 \cdot \text{ч}) \quad (9)$$

и

$$OC_y = 3600 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D_{\text{нд}} \cdot 0,26}{3,14 \cdot 0,003}} \cdot 11,7 \cdot 0,01 = 0,19 \text{ кг/}(\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (10)$$

откуда $D = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

В работе Попковича Г.С., Репина Б.Н. «Системы аэрации сточных вод», вышедшей в 1986 году, приводятся экспериментальные данные, которые получены различными исследователями и в соответствии с которыми величина поверхностного коэффициента диффузии кислорода воздуха в воду в процессе работы мелкопузырчатой системы аэрации при температуре воды $t=20^\circ\text{C}$ имела значения $D = 1,72 \cdot 10^{-9} \dots 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Принимая во внимание, что в формуле (3) величина коэффициента диффузии кислорода воздуха в воду стоит в степени 0,5, точность полученных экспериментальных данных можно считать удовлетворительной, а для практических расчетов следует принимать значение $D = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Вычислив значения величин площади удельной поверхности межфазного контакта в аэрационном бассейне A_y по формуле (4) и коэффициента массопередачи границы раздела фаз K_L по формуле (3), можно определить значение основного технологического показателя мелкопузырчатой пневматической системы аэрации – ее удельной окислительной способности – по формуле (2).

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин, В.В. Князев, Г.П. Давыдов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 134–139.

2. Мешенгиссер, Ю.М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод: автореф. дис. ... д-ра техн. наук по научной специальности 05.03.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» / Ю.М. Мешенгиссер. – М., 2005. – 52 с.

References

1. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of the kinetics of mass transfer processes from the popping gas bubbles in wastewater treatment / S.Yu. Andreev, V.G. Kamburg, A.A. Petrunin, V.V. Knyazev, G.P. Davydov // Regional Architecture and Engineering. – 2013. – №3. – С. 134–139.

2. Meshengisser, Yu.M. Theoretical justification and development of new polymeric aerators for biological wastewater treatment: Author's abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Sciences on scientific speciality 05.03.04 «Water supply, sewerage, construction systems of protection of water resources» / Yu.M. Meshengisser. – М., 2005. – 52 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2023_3_159

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Андреев Сергей Юрьевич,

доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Тюменский индустриальный университет

Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Белова Лариса Владимировна,

кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Начертательная геометрия и графика»,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: belovalv@tyuiu.ru

Пензенский государственный университет

Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,

Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Industrial University of Tyumen

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Belova Larisa Vladimirovna,

Candidate of Sciences, Head of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics», Professor of the department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: belovalv@tyuiu.ru

Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЕЛКОПУЗЫРЧАТЫХ АЭРАТОРОВ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Приведены результаты анализа известных теорий массопередачи кислорода воздуха в воду в процессе работы пневматических аэрационных систем. Разработана теоретическая модель процесса массопередачи кислорода, с помощью которой можно учесть эффект деформации пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах. Получена математическая зависимость, позволяющая определить величину фактора обновления деформированной поверхности пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах S, c^{-1} . При использовании полученной математической зависимости можно будет оптимизировать процессы расчета и эксплуатации пневматических аэрационных систем.

Ключевые слова: массопередача кислорода, коэффициент диффузии, окислительная способность, режимы всплывания, скорость массопередачи, коэффициент формы, коэффициент дисперсности

THEORETICAL BASIS OF CALCULATING THE PROCESS OF PNEUMATIC FINE-BUBBLE AERATORS OPERATION

S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy

The results of the analysis of the well-known theories of mass transfer of air oxygen into water during the operation of pneumatic aeration systems are presented. A theoretical model of the oxygen mass transfer process has been developed which takes into account the deformation effect of air bubbles surfacing in turbulent modes. The mathematical dependence has been obtained that makes it

possible to determine the value of the deformed surface renewal factor S , s-1 for air bubbles surfacing in turbulent modes. The use of the obtained mathematical dependence will optimize the principles of calculation and operation of pneumatic aeration systems.

Keywords: oxygen mass transfer, diffusion coefficient, oxidation capacity, air bubble popping modes, mass transfer rate, shape factor, dispersion coefficient

В настоящее время на станциях биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод широко используются коридорные аэротенки-вытеснители с пневматической системой аэрации, которая предназначена для обеспечения аэробных микроорганизмов активного ила кислородом воздуха и поддержания хлопьев активного ила во взвешенном состоянии.

Аэрационная система аэротенка представляет собой наиболее энергоемкий элемент станций биологической очистки, в связи с чем оптимизация процессов проектирования и эксплуатации пневматических аэраторов является актуальной задачей [1].

В основе массопередачи кислорода в жидкость из пузырька воздуха, всплывающего в аэрационном объеме, лежит процесс молекулярной диффузии. В своей работе «*On liquid diffusion*», вышедшей в 1855 г., Фик установил физическую аналогию процессов теплопередачи и молекулярной диффузии, что позволило ему использовать уравнение Фурье для определения скорости диффузионного переноса кислорода воздуха в воду в процессе аэрации:

$$\frac{dM}{dt} = -D \cdot A \frac{dC}{dy}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где $\frac{dM}{dt}$ – скорость процесса массопередачи, кг/с; D – коэффициент диффузии газа в жидкость через поверхность контакта фаз «газ – жидкость», м²/с; A – площадь поверхности межфазового контакта, м²; $\frac{dC}{dy}$ – градиент концентрации растворенного кислорода в направлении диффузии (в нормальном направлении к поверхности раздела фаз), кг/м⁴.

Движущей силой процесса массопередачи кислорода воздуха внутри всплывающего пузырька в соответствии с формулой (1) является градиент его концентрации в жидкой среде.

В своей работе «*The rate of solution of solid substances in their own solutions*», вышедшей в 1897 г., Нойес и Уитни показали, что скорость растворения твердого вещества пропорциональна разности концентраций насыщенного раствора в тонкой пленке на поверхности этого вещества C_n , кг/м³, и его концентрации в данном растворе C , кг/м³:

$$\Delta C = C_n - C, \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

В 1904 г. нобелевский лауреат Нернст в своей работе «*Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen Systemen*» поддержал гипотезу Нойеса и Уитни и выдвинул предположение о том, что к поверхности твердого тела прилегает неподвижный тонкий слой жидкости, в котором происходит процесс диффузии, а раствор при достаточно интенсивном перемешивании имеет практически постоянный состав.

В соответствии с ранее сформировавшимися представлениями о процессе молекулярной диффузии в работе Льюиса и Уитмена «*Principles of gas absorption*», вышедшей в 1924 году, была описана двухпленочная модель массопередачи, которая предполагает наличие механизма квазистационарной молекулярной диффузии. В рамках процесса квазистационарной молекулярной диффузии суммарная величина градиента концентрации растворенного кислорода в газовой и жидкой пленках на поверхности пузырька воздуха может быть определена по формуле

$$\frac{dC}{dy} = \frac{C_n - C}{y}, \text{ кг/м}^4, \quad (3)$$

где y – суммарная толщина газовой и жидкой пленок на поверхности пузырька воздуха, м, а формула (1) может быть представлена в виде

$$\frac{dM}{dt} = \frac{D_{\text{сд}}}{y} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C) = K_{\text{Лсд}} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C), \text{ кг/с}, \quad (4)$$

где $D_{\text{сд}}$ – коэффициент молекулярной (псевдостационарной) диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

$K_{\text{Лсд}} = \frac{D_{\text{сд}}}{y}$ – коэффициент массопередачи границы раздела фаз в процессе стационарной молекулярной диффузии.

Критикуя положение о стационарности процесса массопередачи кислорода воздуха через поверхность всплывающего пузырька воздуха, Хигби в своей работе «*The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure*», вышедшей в 1935 году, сформулировал теорию пенетрации (проникания), также основанную на двухпленочной модели, но отрицающую допущение о квазистационарном характере процесса массопередачи. Теория пенетрации предусматривает положение о том, что жидкая пленка на поверхности всплывающего пузырька воздуха постоянно обновляется под воздействием набегающего на него потока воды, и из-за кратковременности контакта фаз в жидкой пленке не успевает установиться стационарный режим массопередачи, а массопередача кислорода в жидкость осуществляется посредством нестационарной молекулярной диффузии.

В этом случае величина коэффициента массопередачи границы раздела фаз может быть определена по формуле, полученной Хигби:

$$K_{\text{Лнд}} = \sqrt{\frac{4 \cdot D_{\text{нд}} \cdot V_{\text{п}}}{\pi \cdot d_{\text{п}}}}, \text{ м/с}. \quad (5)$$

Величина скорости процесса нестационарной массопередачи кислорода в воду может быть найдена по формуле

$$\frac{dM}{dt} = K_{\text{Лнд}} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C) = \sqrt{\frac{4 \cdot D_{\text{нд}} \cdot V_{\text{п}}}{\pi \cdot d_{\text{п}}}} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C), \text{ кг/с}, \quad (6)$$

где $D_{\text{нд}}$ – коэффициент нестационарной молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$ (величина коэффициента $D_{\text{нд}}$ отличается от величины коэффициента псевдостационарной молекулярной диффузии $D_{\text{сд}}$, $\text{м}^2/\text{с}$); $d_{\text{п}}$ – диаметр пузырька воздуха, м; $V_{\text{п}}$ – скорость всплывания в воде пузырька воздуха, м/с.

В теории П.В. Данквертса, описанной в работе «*Significance of liquid-film coefficients in gas absorption*», вышедшей в 1951 году, было отброшено допущение о движущихся поверхностных пленках, было высказано предположение о том, что поверхность всплывающего в турбулентном режиме пузырька воздуха непрерывно обновляется свежей жидкостью под действием турбулентных пульсаций набегающего потока жидкости. Была получена формула для определения величины поверхностного коэффициента массопередачи

$$K_{\text{Лтд}} = \sqrt{D_{\text{тд}} \cdot S}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где $D_{\text{тд}}$ – коэффициент турбулентной диффузии, величина которого отличается от значений коэффициентов $D_{\text{сд}}$ и $D_{\text{нд}}$, $\text{м}^2/\text{с}$; S – фактор обновления поверхности пузырька воздуха, величина которого определяется как доля поверхности, обновляемой в единицу времени, с^{-1} .

Величина скорости процесса турбулентной массопередачи кислорода в воду может быть определена по формуле

$$\frac{dM}{dt} = K_{\text{ЛТД}} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C) = \sqrt{D_{\text{ТД}} \cdot S} \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C), \text{ кг / с.} \quad (8)$$

В своей теории П.В. Данквертс не рассматривал конкретных методов, позволяющих определить величину фактора S , что затрудняет использование его теории для расчета аэрационных систем.

В работе [2] были проанализированы закономерности всплывания пузырька воздуха в чистой воде и выделены следующие его режимы:

1. Ламинарный режим всплывания пузырьков воздуха.
2. Ламинарный режим всплывания пузырьков воздуха со скользящим пристеночным слоем. В этом режиме пузырьки воздуха имеют строго сферическую форму, и зависимость величины скорости всплывания $V_{\text{п}}$ от его диаметра $d_{\text{п}}$ описывается общеизвестной формулой Стокса. В работе Дерягина В.В. «Кинематическая теория флотации малых частиц», опубликованной в журнале «Успехи химии» (1981 г, №51), приводятся данные о том, что в отличие от всплывания твердого тела пузырек воздуха сохраняет ламинарный (стоксовский) режим всплывания вплоть до значения критерия Рейнольдса $Re = 20$ вследствие эффекта проскальзывания пристеночного слоя.
3. Переходный режим всплывания пузырьков воздуха сферической формы со скользящим пристеночным слоем. На верхней границе переходного режима всплывания как сферического твердого тела, так и сферического пузырька воздуха критерий Рейнольдса имеет величину $Re = 500$ [3].
4. Турбулентный режим всплывания деформированных пузырьков воздуха. В этом режиме всплывания пузырьки воздуха деформируются (в отличие от сферических твердых тел, всплывающих в турбулентном режиме). Шарообразная форма пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, сжимается, в результате чего он приобретает вид сплюсненного сфероида с большой осью, перпендикулярной к направлению его движения. Изменение формы пузырьков воздуха обуславливает переход вязкого сопротивления к сопротивлению изменяющейся формы, в результате чего скорость всплывания пузырьков $V_{\text{п}}$ уменьшается при увеличении его диаметра $d_{\text{п}}$.
5. Турбулентный режим всплывания в области развитой турбулентности (в области автомодельного закона сопротивления). В этом режиме сплющивание пузырьков воздуха прекращается, они приобретают форму выпукло-вогнутой линзы, зависимость величины скорости всплывания пузырька воздуха $V_{\text{п}}$, м/с, от его диаметра $d_{\text{п}}$, м, в этом режиме описывается формулой

$$V_{\text{п}} = 0,83 \cdot d_{\text{п}}^{0,25}, \text{ м/с.} \quad (9)$$

Теории Льюиса – Уитмена, Хигби и Данквертса описывают процесс массопередачи кислорода воздуха в воду из пузырьков, всплывающих в различных режимах.

Теория Льюиса – Уитмена описывает процесс псевдостационарной молекулярной диффузии через неподвижный пограничный слой сферического пузырька воздуха, всплывающего в ламинарном режиме.

Теория Хигби описывает процесс нестационарной молекулярной диффузии через движущийся пограничный слой сферического пузырька воздуха, всплывающего в ламинарном и переходном режимах со скользящим пограничным слоем.

Теория Данквертса описывает процесс турбулентной диффузии через непрерывно обновляющуюся под действием турбулентных пульсаций деформированную поверхность пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме и режиме развитой турбулентности.

Во всех режимах всплывания пузырьков величина скорости процесса массопередачи кислорода воздуха в воду может быть определена по формуле

$$\frac{dM}{dt} = K_L \cdot A \cdot (C_{\text{н}} - C), \text{ кг / с,} \quad (10)$$

где в качестве величины поверхностного коэффициента массопередачи K_L , м/с, используются значения, вычисленные по формулам (4), (5) или (7), для пузырьков, всплывающих в соответствующих режимах.

В связи с тем что в настоящее время не разработана методика корректного расчета величины фактора обновления поверхности деформированного пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, S , с⁻¹, сложилась практика, в соответствии с которой принимается допущение о том, что образующиеся в аэрационном объеме в результате работы мелкопузырчатой пневматической системы аэрации пузырьки воздуха имеют строго сферическую форму и одинаковую среднюю величину диаметра d_n , а значение поверхностного коэффициента массопередачи может быть вычислено по формуле Хигби (5).

В работе Уилки и Чанга «*Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions*», вышедшей в 1955 году, были описаны экспериментальные исследования, которые позволили им, опираясь на принятые допущения, установить величину коэффициента диффузии кислорода воздуха в воду в процессе работы мелкопузырчатой системы аэрации при температуре воды $t = 20$ °С $D_{нд} = 1,77 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

В работе Рамма В.М. «Адсорбция газов», вышедшей в 1976 году, приводятся сведения о том, что величина коэффициента диффузии кислорода воздуха в воду в процессе работы мелкопузырчатой системы аэрации при температуре воды $t = 20$ °С имела значение $D_{нд} = 1,80 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

В практике расчета аэрационных систем также принято выражать скорость процесса массопередачи в единицах концентрации растворенного в аэрационном объеме кислорода. С этой целью правые и левые части уравнения (10) необходимо поделить на величину аэрационного объема W_a , м³.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dM}{W_a \cdot dt} = K_L \cdot A_y \cdot (C_n - C) = \frac{K_w}{3600} \cdot (C_n - C), \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}, \quad (11)$$

где $A_y = \frac{A}{W_a}$ – удельная площадь поверхности межфазового контакта, м²/м³;

$K_w = 3600 \cdot K_L \cdot A_y$ – объемный коэффициент массопередачи кислорода воздуха в воду, ч⁻¹.

Для оценки эффективности аэрационной системы используется технологический показатель «удельная окислительная способность» (ОС_y). Понятие «удельная окислительная способность» системы аэрации было впервые введено Кессенером и Риббиусом, и оно характеризует скорость растворения кислорода воздуха в единице объема полностью обескислороженной воды. Величина удельной окислительной способности аэратора определяется по формуле

$$\text{ОС}_y = K_w \cdot C_n, \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ч)}, \quad (12)$$

где K_w – объемный коэффициент массопередачи кислорода в воду, ч⁻¹.

В процессе работы пневматических систем аэрации образуются деформированные пузырьки воздуха, всплывающие в турбулентных режимах. Учесть эффект деформации поверхности пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах, может позволить анализ их геометрических характеристик.

Поскольку поперечный размер пузырька воздуха всегда имеет форму круга, то в качестве его основного линейного размера принимается диаметр поперечного сечения максимальной площади ω_n , м².

$$d_n = \sqrt{\frac{4\omega_n}{\pi}}, \text{ м}. \quad (13)$$

В качестве характерного линейного размера пузырька воздуха h_n , м, используется величина, определяемая как отношение объема пузырька воздуха W_n , м³, к максимальной площади его поперечного сечения ω_n , м²:

$$h_n = \frac{W_n}{\omega_n}, \text{ м.} \quad (14)$$

Степень дисперсности пузырька воздуха характеризуется величиной его дисперсного размера δ_n , определяемого как отношение объема пузырька воздуха W_n , м³, к площади поверхности пузырька воздуха f_n , м²:

$$\delta_n = \frac{W_n}{f_n}, \text{ м.} \quad (15)$$

Особенности формы пузырьков воздуха характеризуются коэффициентом формы, величина которого определяется как отношение площади его внешней поверхности f_n , м², к максимальной площади его поперечного сечения ω_n , м²:

$$K_\phi = \frac{f_n}{\omega_n}. \quad (16)$$

Безразмерная величина, определяемая как отношение диаметра пузырька воздуха d_n , м, к его дисперсному размеру δ_n , м, является коэффициентом дисперсности пузырька воздуха K_d :

$$K_d = \frac{d_n}{\delta_n}. \quad (17)$$

Из (14), (15), (16) и (17) следует, что

$$h_n = \frac{W_n}{\omega_n} = \frac{W_n}{f_n} \cdot K_\phi = \delta_n \cdot K_\phi = \frac{K_\phi}{K_d} \cdot d_n, \text{ м.} \quad (18)$$

Пузырек воздуха, всплывающий в любом режиме, имеет объем

$$W_n = \delta_n \cdot f_n = \frac{d_n}{K_d} \cdot K_\phi \cdot \omega_n = \frac{d_n}{K_d} \cdot K_\phi \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} = \frac{K_\phi}{K_d} \cdot \frac{\pi \cdot d_n^3}{4}, \text{ м}^3. \quad (19)$$

Вычислить величину фактора обновления поверхности пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, S , с⁻¹, может позволить термодинамический подход, предполагающий, что интенсивность процесса обновления поверхности пузырька воздуха, происходящего в результате действия на поверхность раздела фаз турбулентных пульсаций скорости набегающего на пузырек потока жидкости, определяется отношением величины элементарной секундной работы (мощности), совершаемой силой избыточного давления воздуха $N_{\Delta P}$, Дж/с, Вт, к значению потенциальной энергии избыточного давления воздуха внутри пузырька $E_{\Delta P}$, Дж:

$$S = \frac{N_{\Delta P}}{E_{\Delta P}}, \text{ с}^{-1}. \quad (20)$$

Величина элементарной секундной работы, совершаемой силой избыточного давления воздуха внутри всплывающего пузырька, может быть определена по формуле

$$N_{\Delta P} = \frac{F_{\Delta P} \cdot \Delta l}{\Delta T} = F_{\Delta P} \cdot V_n = \Delta P \cdot \omega_n V_n, \frac{\text{Дж}}{\text{с}}, \text{ Вт}, \quad (21)$$

где $F_{\Delta P}$ – сила избыточного давления воздуха внутри всплывающего пузырька, Н; Δl – элементарное расстояние, м, на которое перемещается пузырек воздуха, движущийся со скоростью V_n , м/с, за элементарное время ΔT , с; ΔP – избыточное давление воздуха внутри пузырька, Па.

Величина потенциальной энергии избыточного давления воздуха внутри пузырька может быть определена по формуле

$$F_{\Delta P} = \Delta P \cdot W_n = \Delta P \cdot \delta_n \cdot f_n = \frac{K_\phi}{K_d} \cdot \Delta P \cdot d_n \cdot \omega_n, \text{ Дж}. \quad (22)$$

Из (20), (21), (22) имеем

$$S = \frac{N_{\Delta P}}{E_{\Delta P}} = \Delta P \cdot \omega_n \cdot V_n \cdot \frac{K_d}{K_\phi \cdot \Delta P \cdot d_n \cdot \omega_n} = \frac{K_d}{K_\phi} \cdot \frac{V_n}{d_n}, \text{ с}^{-1}. \quad (23)$$

С учетом (23) формула (7) может быть записана в виде

$$K_{LTD} = \sqrt{D_{TD} \cdot \frac{K_d}{K_\phi} \cdot \frac{V_n}{d_n}}, \text{ м/с}. \quad (24).$$

Формула (23) в отличие от формулы Хигби (5) учитывает эффект изменения формы пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, путем введения отношения коэффициентов $\frac{K_d}{K_\phi}$.

Для расчета мелкопузырчатой системы аэрации могут быть приняты следующие исходные данные: средняя величина диаметра образующихся пузырьков воздуха $d_n = 1,5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ м, скорость всплывания пузырька воздуха $V_n = 0,22 - 0,34$ м/с, $V_n = 0,0327 \cdot d_n^{-0,360}$; коэффициент формы пузырька воздуха $K_\phi = 2,63 - 4,0$; $K_\phi = 0,416 \cdot d_n^{-0,348}$; коэффициент дисперсности пузырька воздуха $K_d = 6,0 - 13,3$; $K_d = 441,4 \cdot d_n^{0,661}$.

При средней величине эквивалентного диаметра пузырьков воздуха, образующихся в аэрационном объеме в процессе работы мелкопузырчатого аэратора, $d_n = 0,003$ м величина коэффициента турбулентной диффузии может быть определена из условия равенства величин поверхностных коэффициентов массопередачи $K_{LHD} = K_{LTD}$, рассчитанных по формулам (5) и (24):

$$K_L = \sqrt{\frac{4 \cdot D_{HD} \cdot V_n}{\pi \cdot d_n}} = \sqrt{D_{TD} \cdot \frac{K_d}{K_\phi} \cdot \frac{V_n}{d_n}}, \text{ м/с}, \quad (25)$$

откуда

$$D_{TD} = \frac{4 \cdot K_\phi}{\pi \cdot K_d} \cdot D_{HD} = \frac{4 \cdot 3,14}{3,14 \cdot 9,5} \cdot 1,8 \cdot 10^{-9} = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (26)$$

Подставляя численные значения коэффициента турбулентной диффузии $D_{TD} = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ в формулы (8) и (25), можно определить величину скорости массопередачи и рассчитать технологические параметры мелкопузырчатой системы аэрации.

1. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин, В.В. Князев, Г.П. Давыдов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С.134–139.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol.95, №1.
3. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ свойств водовоздушной смеси, содержащей пузырьки, всплывающие в турбулентном режиме и режиме автомодельности закона сопротивления / С.Ю. Андреев, В.В. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2. – С. 134–141.

References

1. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of the kinetics of mass transfer processes from the popping gas bubbles in wastewater treatment / S.Y. Andreev, V.G. Kamburg, A.A. Petrunin, V.V. Knyazev, G.P. Davydov // Regional Architecture and Engineering. – 2013. – №3. – С. 134-139.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water-Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol.95. – No.1.
3. Andreev, S.Yu. Theoretical Analysis of Properties of Water-Air Mixture Containing Bubbles Floating in Turbulent Mode and Resistance Law Automodality Mode / S.Yu. Andreev, V.V. Knyazev (in Russian) // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – №2. – P. 134–141.

УДК 697.9

DOI 10.54734/20722958_2023_3_167

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Петрова Ксения Александровна,
магистрант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Averkin Aleksandr Grigorevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Petrova Kseniya Aleksandrovna,
Student of the master's program of the
department «Heat and Ventilation»

Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Information Support
Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВОЗДУХА В ЗОНЕ ВСАСЫВАНИЯ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова

Теоретические и экспериментальные исследования в области климатизации направлены на решение проблемы сохранения объектов историко-культурного наследия, размещенных в православных культовых сооружениях, и создания благоприятных условий пребывания прихожан и персонала в залах богослужения. Для этих целей авторами предложена местная механическая вытяжная система вентиляции с использованием зонтов, расположенных над подсвечниками для улавливания и удаления вредностей, образующихся при сгорании церковных свечей. Для обеспечения эффективной работы вытяжного зонта проведены экспериментальные исследования параметров воздуха в воздушном потоке в зоне всасывания зонта при высоте установки над подсвечником $h_{\text{сп}} = 500$ мм и разным количестве сгораемых свечей.

На основе полученных результатов построены профили и поля скоростей и температур воздуха в свободном пространстве зонта, выявлены численные значения данных параметров воздуха. Получены графические зависимости температуры и скорости воздуха, объема удаляемого зонтом воздуха и объемной концентрации копоти и сажи при разных количествах сжигаемых свечей на подсвечнике. Исследованы и представлены графики изменений данных параметров воздуха в зоне всасывания в зависимости от высоты установки зонта над подсвечником.

Предложены формулы для определения расчетной высоты установки зонта над подсвечником, диаметра зонта и диаметра «шейки» разгонного участка в зоне свободного пространства зонта.

Ключевые слова: климатизация культового сооружения, зал богослужения, подсвечник, церковная свеча, убранство, копоть, сажа, профиль температуры и скорости, вытяжной

METHODOLOGICAL BASES FOR STUDYING AIR FLOW PARAMETERS IN THE SUCTION ZONE OF THE HOOD

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova

Theoretical and experimental studies in the field of climatization are aimed at solving the problem of preserving historical and cultural heritage located in Orthodox places of worship and creating favorable conditions for the stay of parishioners and staff during the service. For these purposes, the authors have proposed a local mechanical exhaust ventilation system using umbrellas located above the candlestick to trap and remove harmful substances during the burning of church candles. To ensure the efficient operation of the exhaust hood, experimental studies of the parameters of air in the air flow in the suction zone of the hood were carried out at an installation height $h_{sp} = 500$ mm above the candlestick and of a different number of candles of combustible candles, n , %.

On the basis of the obtained results, profiles and fields of air velocities and temperatures in the free space of the umbrella were constructed and the numerical values of these air parameters were identified. Graphic dependences of temperature and air speed, the volume of air removed by the umbrella and the volumetric concentration of soot and soot for different amounts of candles burned on the candlestick were obtained. Graphs of changes in these air parameters in the suction zone, depending on the height of the umbrella above the candlestick, have been studied and presented.

Formulas are proposed for determining the estimated height of the umbrella installation above the candlestick, the diameter of the umbrella and the diameter of the «neck» of the accelerating section in the zone of the free space of the umbrella. The obtained results make it possible to determine the installation height of the umbrella and its dimensions at the level of the «neck» of the upper section of the stream for effective trapping and removal of soot and soot in places of formation and to ensure the safety of the decoration and comfortable conditions for the parishioners.

Keywords: air conditioning of a religious building, worship hall, candlestick, church candle, decoration, soot, soot, temperature and velocity profile, exhaust hood, umbrella diameter, free space, air flow, volumetric concentration, suction zone, microclimate, axial velocity and temperature, experimental stand, convective flow model

В православных культовых сооружениях в процессе проведения обрядов традиционно используются горящие лампадное масло и церковные свечи, которые установлены на множестве подсвечников и находятся в руках прихожан. Известно, что в процессе горения свечей в зале богослужения выделяются значительное количество вредных продуктов сгорания – копоть, сажа, несгораемые частицы углерода, воска, а также влаговыведения, углекислый газ (рис. 1).

Вредности, образующиеся при сгорании свечей, переносятся воздушными потоками внутри помещения и при прикосновении абсорбируются на поверхности икон, живописи и других элементов убранства, нанося им непоправимый ущерб, что требует со временем значительных затрат на выполнение реставрационных работ и отрицательно влияет на обеспечение комфортных условий для прихожан и персонала. Подобная ситуация складывается даже при наличии организованной естественной, совместно с общеобменной механической, приточно-вытяжной вентиляции. Обследование ряда церквей, храмов и соборов Пензенской области подтвердило, что объекты историко-культурного наследия и элементы убранства зала богослужения имеют неприглядный внешний вид из-за наличия на поверхностях слоя копоти и сажи. Решению актуальной проблемы сохранения историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях и создания благоприятных условий пребывания прихожан и персонала авторы посвятили комплекс теоретических и экспериментальных исследований, основанных на методологических принципах.

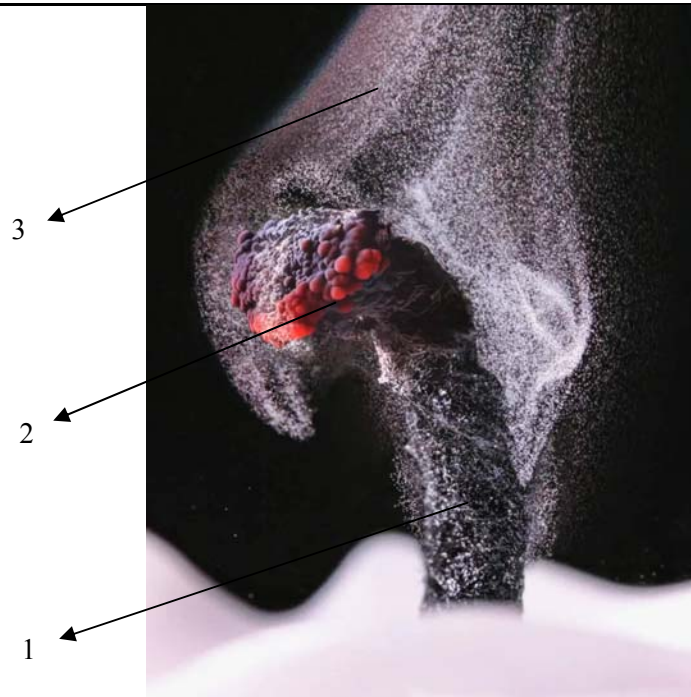


Рис. 1. Изображение продуктов сгорания и несгораемых частиц при сжигании церковных свечей:

- 1 – начальный поток сгораемых частиц свечи; 2 – несгораемые частицы углерода;
3 – аэрозольные сгоревшие частицы свечи в воздушном потоке пламени

Для эффективного улавливания и удаления копоти и сажи, а также полной локализации загрязненного теплового потока, формируемого от горящих церковных свечей, впервые разработана местная вытяжная вентиляция с зонтом, установленным над подсвечником, как единая конструкция. Проведенные исследования доказали, что при решении задачи локализации вредностей от горящих свечей необходимо учитывать скоростные и температурные поля восходящего потока в зоне свободного пространства $h_{\text{сп}}$, мм, между подсвечником и нижней кромкой вытяжного зонта. В процессе комплексных исследований при $h_{\text{сп}} = 300$ мм, $h_{\text{сп}} = 400$ мм, $h_{\text{сп}} = 500$ мм анализировалось влияние количества сгораемых свечей n , %, высоты свободного пространства $h_{\text{сп}}$, мм, между подсвечником и зонтом на количество подтекающего из помещения стока к восходящему потоку, на скорость $V_{\text{сп}}$, м/с, и температуру воздуха $t_{\text{сп}}$, °С, в конвективной струе в свободном пространстве зонта, а также на скорость воздуха в центре всасывающего отверстия зонта $v_{\text{ос}}$, м/с, на объемную концентрацию копоти и сажи $q_{\text{сп}}$, мг/м³, количество удаляемого зонтом воздуха L_z , м³/ч.

Исследования динамических измерений при $h_{\text{сп}} = 500$ мм и $n = 25$ %, $n = 50$ %, $n = 100$ % указанных выше параметров воздуха в восходящем потоке проводились на разработанном универсальном экспериментальном стенде (рис. 2), который использовался в процессе выполнения экспериментов при $h_{\text{сп}} = 300$ мм, $h_{\text{сп}} = 400$ мм и $n = 25$ %, $n = 50$ %, $n = 100$ %.

В процессе проведения исследований использовались зонты в виде конуса с углом раскрытия 60° с целью предполагаемого обеспечения равномерной скорости всасывания воздушного потока в сечении входного отверстия зонта. Восходящий поток в свободном пространстве вытяжного зонта образовывался за счет теплоты от горящих свечей, размещенных на подсвечнике, и в результате разрежения, созданного внутри зонта вытяжным вентилятором. Воздушный сток из помещения лаборатории свободно подтекал со всех сторон к восходящему потоку и удалялся через систему местной вытяжной вентиляции с использованием вытяжных зонтов. Во избежание искажения профиля скоростей и температур в зоне экспериментального стенда исключались боковые скорости воздушного потока. Зонты располагались над подсвечниками с горящими свечами, и их круглая форма соответствовала конфигурации подсвечника. Диаметр зонта принимался $d_z = 500$ мм при размере подсвечника $d_{\text{п}} = 350$ мм с наличием 50 установочных мест для размещения свечей. В данной работе прямоуголь-

ные конические зонты и подсвечники не рассматривались. Результаты, полученные на основе испытаний круглых зонтов, с некоторыми допущениями можно использовать при исследовании других конфигураций вытяжных зонтов и подсвечников для улавливания и удаления вредностей от сгорания церковных свечей.

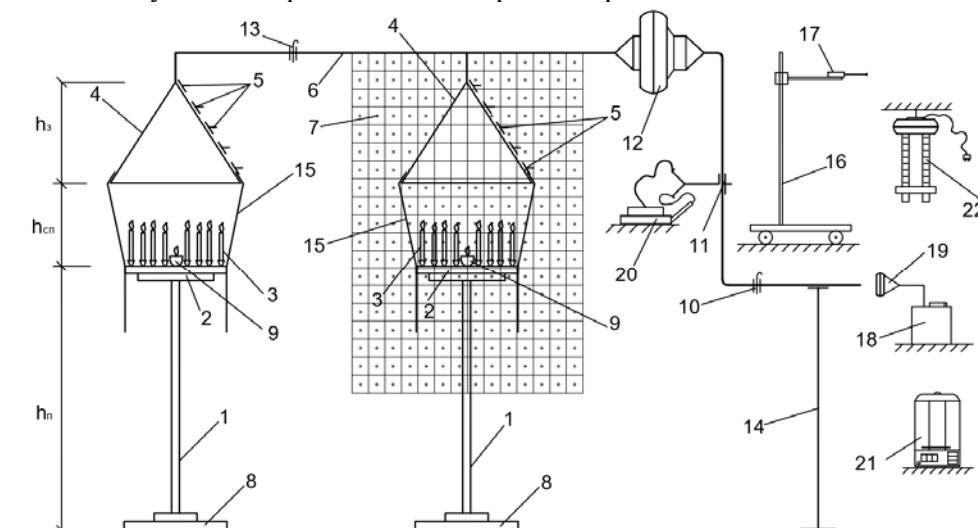


Рис. 2. Разработанный авторами экспериментальный стенд системы местной вытяжной вентиляции с удалением загрязненного воздуха с помощью зонтов из верхней зоны:

- 1 – стойка подсвечника; 2 – столешница; 3 – свеча; 4 – вытяжной зонт; 5 – отверстие для измерения скорости, температуры и полного давления внутри зонта; 6 – воздуховод; 7 – условная координатная сетка; 8 – основание подсвечника; 9 – лампада; 10 – шибер; 11 – отверстие для измерения скорости воздуха в воздуховоде; 12 – канальный вентилятор; 13 – шибер; 14 – подставка для вентилятора; 15 – крепление вытяжного зонта со столешней; 16 – стойка координатника; 17 – штанга для крепления термоанемометра; 18 – пробоотборник; 19 – фильтродержатель; 20 – микроманометр; 21 – электронные весы, 22 – психрометр

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применительно к $h_{\text{сп}} = 500$ мм и $n = 25\%$, $n = 50\%$, $n = 100\%$ в виде закономерностей профилей скоростных и температурных полей в поперечном сечении восходящего потока в зоне свободного пространства зонта над подсвечником с горящими свечами (рис. 3, 4, 5). При этом проводился сравнительный анализ результатов, полученных при $h_{\text{сп}} = 500$ мм, с вариантами $h_{\text{сп}} = 300$ мм и $h_{\text{сп}} = 400$ мм с целью определения оптимальной высоты установки зонта над подсвечником для эффективной локализации вредностей, образующихся при сгорании свечей. Результаты комплекса экспериментальных исследований профиля поля скорости зонта $v_{\text{сп}}$, м/с, и температур $t_{\text{сп}}$, °C, воздуха в свободном пространстве в поперечном сечении восходящего потока, образующегося за счет гравитационных сил от теплоты горящих свечей и разрежения, созданного местной механической вытяжной вентиляцией при $h_{\text{сп}} = 500$ мм и заполняемости свечами подсвечника $n=25\%$ (13 свечей), приведены на рис. 3, а среднестатистические значения $v_{\text{сп}}$, м/с, и $t_{\text{сп}}$, °C, – в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Среднестатистические значения скорости $v_{\text{сп}}$, м/с, и температуры $t_{\text{сп}}$, °C, воздуха в восходящем потоке при $h_{\text{сп}} = 500$ мм, $n=25\%$ (13 свечей)

X , см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$t_{\text{сп}}$, см	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$	$V_{\text{сп}}$	$t_{\text{сп}}$
50	0,1	31,9	0,1	32,4	0,1	33,6	0,11	35,2	0,18	37,8	0,35	41,7	0,6	43,1	0,36	41,8	0,19	38,2	0,12	35,0	0,1	33,6	0,1	32,4	0,1	31,7
40	0,09	31,4	0,09	32,2	0,095	33,6	0,1	34,6	0,16	37,3	0,3	41,5	0,4	42,7	0,31	41,8	0,17	37,7	0,11	34,4	0,11	33,5	0,1	32,3	0,1	31,3
30	0,08	31,1	0,085	31,5	0,09	32,6	0,11	34,4	0,12	37,1	0,2	41,1	0,32	41,3	0,21	41,2	0,13	37,0	0,11	34,5	0,095	32,4	0,09	31,3	0,1	31,3
20	0,06	30,3	0,06	31,1	0,07	31,7	0,08	32,6	0,1	33,5	0,15	35,7	0,23	36,5	0,14	35,6	0,095	33,7	0,07	32,7	0,06	31,6	0,05	30,8	0,05	30,2
10	0,06	29,5	0,06	29,6	0,06	30,0	0,07	30,7	0,1	32,4	0,14	32,5	0,15	32,6	0,13	32,5	0,1	32,3	0,07	30,6	0,06	29,9	0,05	29,5	0,05	29,4
0	0,02	28,7	0,02	28,7	0,02	28,8	0,03	28,8	0,03	28,8	0,04	30,1	0,04	31,4	0,04	30,2	0,03	28,8	0,03	28,8	0,02	28,8	0,02	28,7	0,02	28,7

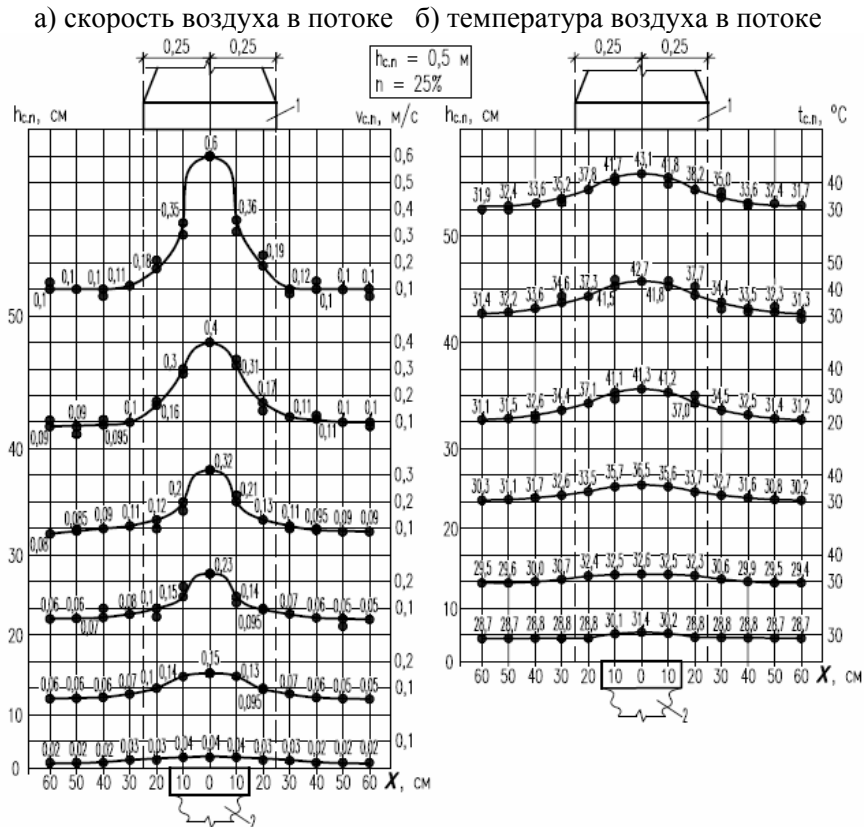


Рис. 3. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении восходящего потока в зоне свободного пространства вытяжного зонта $h_{\text{с.п.}} = 500 \text{ мм}$ при количестве горящих свечей на подсвечнике $n=25\%$ (13 шт):
1 – приемное отверстие зонта; 2 – подсвечник

Экспериментально установлено влияние количества горящих свечей на гравитационные силы, возникающие за счет теплоты сгорания воска. При высоте свободного пространства $h_{\text{с.п.}} = 500 \text{ мм}$ и заполняемости свечами подсвечника $n=50\%$ (25 свечей) профили скоростей $v_{\text{с.п.}}, \text{ м/с}$, и температур воздуха $t_{\text{с.п.}}, ^\circ\text{C}$, в поперечном сечении восходящего потока возрастают по сравнению с $n=25\%$. Результаты приведены на рис. 4, а среднестатистические значения $v_{\text{с.п.}}, \text{ м/с}$, и $t_{\text{с.п.}}, ^\circ\text{C}$, – в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Среднестатистические значения скорости $v_{\text{с.п.}}, \text{ м/с}$, и температуры $t_{\text{с.п.}}, ^\circ\text{C}$, в восходящем потоке при $h_{\text{с.п.}} = 500 \text{ мм}$, $n=50\%$ (25 свечей)

$X, \text{ см}$	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60
$h_{\text{с.п.}}, \text{ см}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$	$t_{\text{с.п.}}$	$V_{\text{с.п.}}$
50	0,1	35,1	0,1	36,4	0,1	38,8	0,1	42,4	0,16	47,5	0,36	51,9	1,0
40	0,08	34,4	0,09	35,6	0,1	33,6	0,11	38,2	0,15	42,9	0,26	43,0	0,38
30	0,02	31,1	0,04	31,5	0,06	32,6	0,08	34,4	0,13	37,1	0,26	41,1	0,28
20	0,01	30,2	0,02	31,0	0,04	31,6	0,08	32,5	0,12	33,4	0,13	35,6	0,16
10	0,01	29,5	0,02	29,6	0,04	30,0	0,06	30,7	0,08	32,4	0,08	32,5	0,08
0	0,01	28,7	0,02	28,7	0,03	28,8	0,045	28,8	0,06	28,8	0,065	30,1	0,07

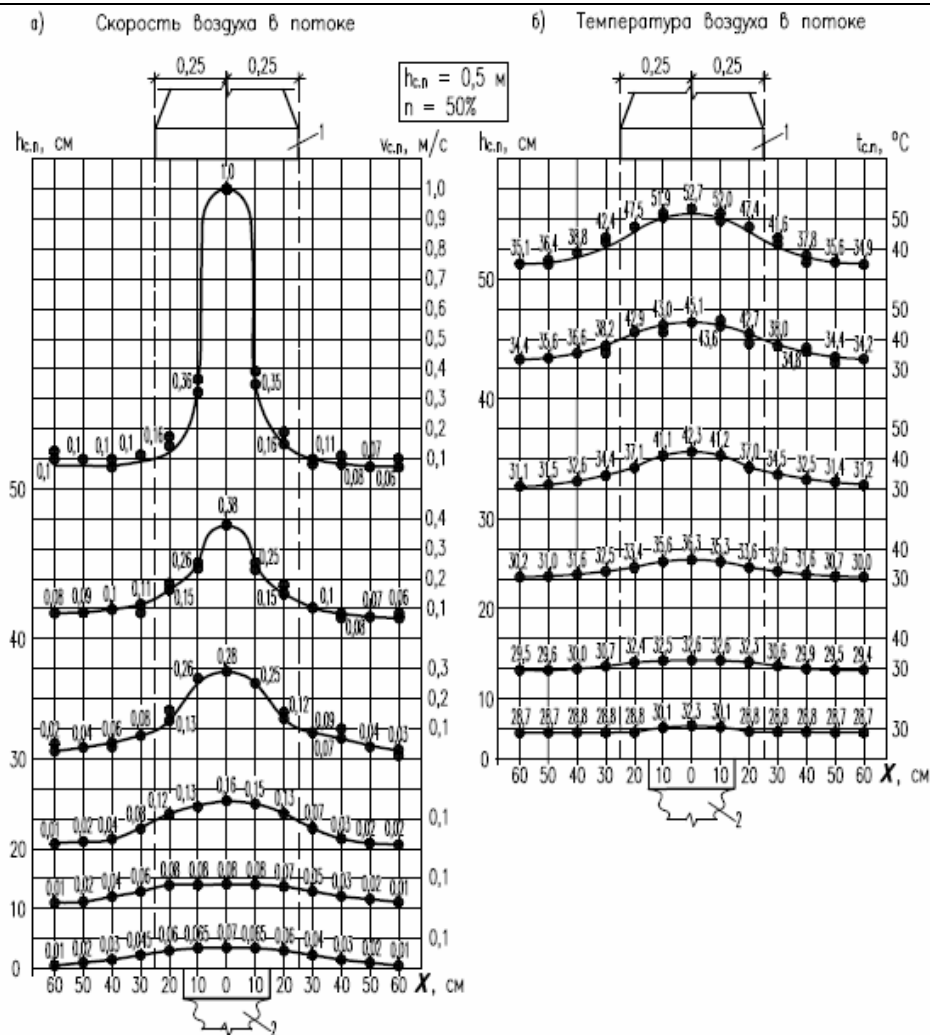


Рис. 4. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{с.п.} = 500 \text{ мм}$ открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника $n=50 \%$ (25 шт):

1 – входное отверстие зонта; 2 – подсвечник

При высоте свободного пространства вытяжного зонта (расстояние от подсвечника до нижней кромки зонта) $h_{с.п.} = 500 \text{ мм}$ и заполняемости свечами подсвечника $n=100 \%$ (50 свечей) профили скоростей $v_{с.п.}, \text{ м/с}$, и температур воздуха $t_{с.п.}, ^\circ\text{C}$, в поперечном сечении восходящего потока резко возрастают (рис. 5). Среднестатистические значения $v_{с.п.}, \text{ м/с}$, и $t_{с.п.}, ^\circ\text{C}$, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Среднестатистические значения скорости $v_{с.п.}, \text{ м/с}$, и температуры $t_{с.п.}, ^\circ\text{C}$, в восходящем потоке при $h_{с.п.} = 500 \text{ мм}$, $n=100 \%$ (50 свечей)

$X, \text{ см}$	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{с.п.}, \text{ см}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$	$V_{с.п.}$	$t_{с.п.}$
50	0,55	44,6	0,58	45,3	0,59	48,7	0,66	50,8	0,79	56,5	1,12	61,9	1,7	63,4	1,1	62,0	0,8	56,3	0,67	50,9	0,58	47,6	0,57	45,4	0,56	44,8
40	0,21	37,1	0,22	38,5	0,23	40,0	0,25	44,4	0,3	48,0	0,47	51,1	0,69	52,3	0,45	51,2	0,28	47,9	0,23	44,5	0,21	40,5	0,2	38,5	0,2	36,9
30	0,12	31,4	0,13	32,4	0,15	33,6	0,16	35,2	0,2	38,9	0,42	42,7	0,43	44,1	0,36	42,8	0,19	38,7	0,15	35,0	0,13	33,5	0,12	32,4	0,11	31,3
20	0,11	30,2	0,11	31,0	0,12	31,6	0,14	32,5	0,19	33,4	0,28	35,6	0,31	36,3	0,27	35,3	0,18	33,6	0,13	32,6	0,12	31,6	0,11	30,7	0,1	30,0
10	0,09	29,5	0,09	29,6	0,1	30,0	0,13	30,7	0,15	30,7	0,21	32,4	0,27	32,6	0,2	32,6	0,14	32,3	0,12	30,6	0,1	29,9	0,1	29,5	0,1	29,4
0	0,01	28,7	0,01	28,7	0,02	28,8	0,08	28,8	0,1	28,8	0,12	30,1	0,15	31,4	0,13	30,1	0,09	28,8	0,07	28,8	0,025	28,8	0,02	28,7	0,02	28,7

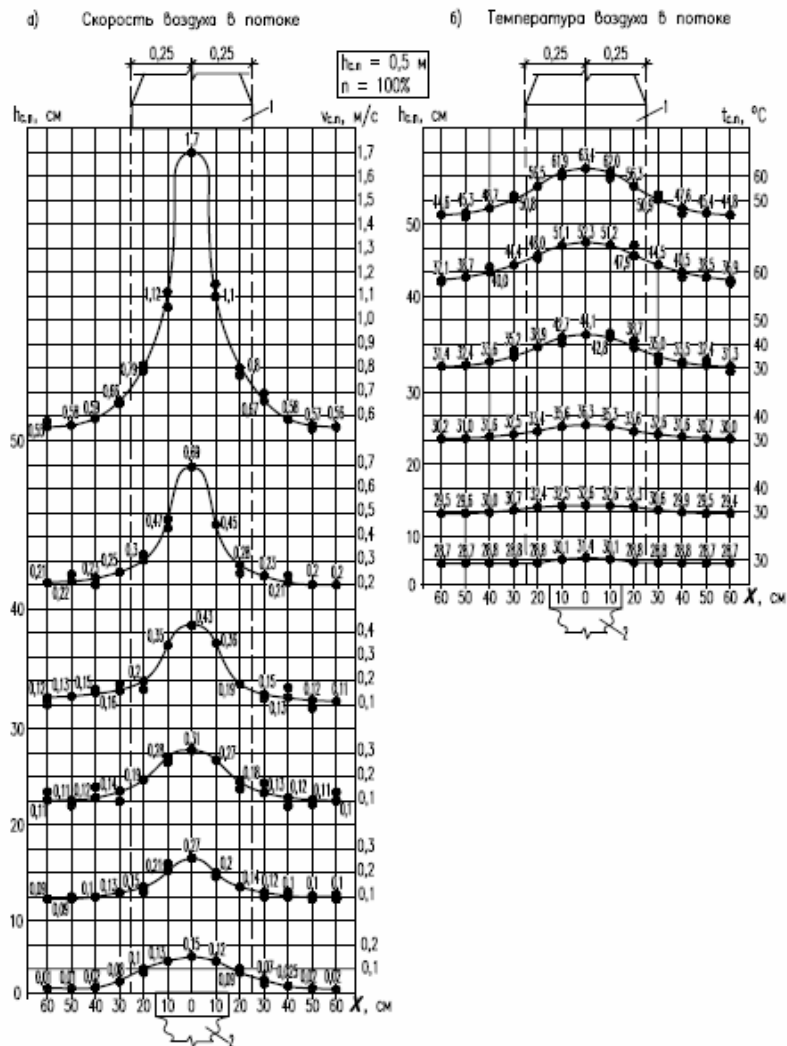


Рис. 5. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{\text{св}} = 500$ мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника $n=100$ % (50 шт):
1 – входное отверстие зонта; 2 – подсвечник

Исследование восходящего воздушного потока в зоне свободного пространства вытяжного зонта при $h_{\text{сн}} = 500$ мм и заполняемости горящими свечами n от 25 % до 100 % (см. рис. 3, 4, 5) позволяет сделать вывод, что по мере приближения потока от периферии к центру всасывающего отверстия и по мере увеличения количества свечей скорость и температура воздуха в плоскости всасывающего отверстия интенсивно возрастают и достигают $v_{\text{ос}} = 1,7$ м/с и $t_{\text{ос}} = 63,4$ °С. Полученные авторами результаты исследования позволяют провести сравнительный анализ в тех же условиях количества горящих свечей при $h_{\text{сн}} = 400$ мм, $v_{\text{ос}} = 1,4$ м/с, $t_{\text{ос}} = 74,4$ °С, при $h_{\text{сн}} = 300$ мм, $v_{\text{ос}} = 0,82$ м/с, $t_{\text{ос}} = 84,2$ °С. Из приведенных данных следует, что максимальные осевая скорость и температура в потоке воздуха обеспечиваются в пределах высоты свободного пространства от $h_{\text{сн}} = 400$ мм до $h_{\text{сн}} = 500$ мм. При расположении вытяжного зонта в установленных пределах высоты $h_{\text{сн}}$ достигается эффективная локализация вредностей от сгорания свечей за счет стабильного и устойчивого восходящего потока воздуха в зоне свободного пространства вытяжного зонта. Высокие скорость и температура воздуха в восходящем потоке соответствуют месту сужения «шейки» разгонного участка (рис. 6).

Схема восходящего потока в зоне свободного пространства $h_{\text{сп}}$, мм, вытяжного зонта, образованного тепловым потоком от горящих свечей, представлена на рис. 6.

При построении схемы использовались фундаментальные основы и закономерности процессов потоков воздуха от горизонтальных равномерно нагретых поверхностей.

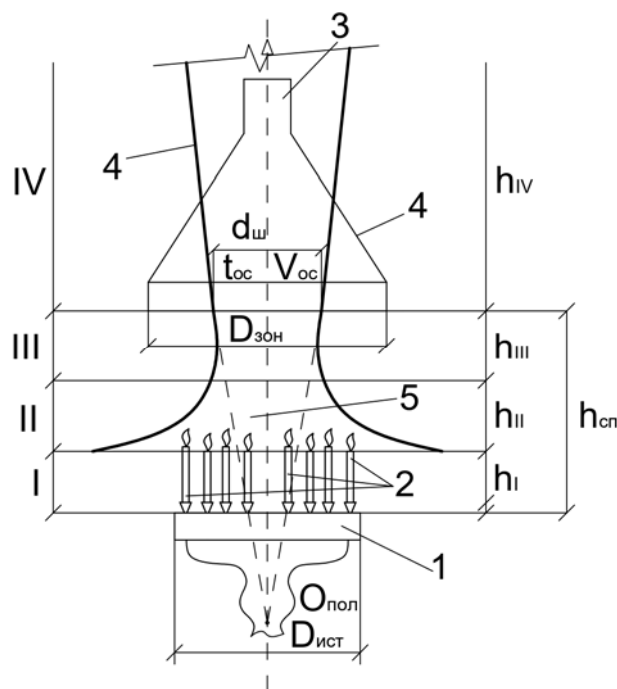


Рис. 6. Схема модели суммарного конвективного потока(струи) над горящими свечами и технологическое размещение вытяжного зонта:

- I – пассивный участок струи; II – активный участок стока прилегающего воздуха;
 III – участок разгона струи; IV – основной участок расширения струи; $D_{зон}$ – диаметр входного сечения зонта, м; $D_{ист}$ – диаметр столешни со свечами, м; $O_{пол}$ – полюс струи;
 $d_{ш}$ – диаметр «шейки» струи, м; h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} – соответственно высота пассивного, активного, разгонного и расширения струи, м;
 1 – подсвечник; 2 – горящие церковные свечи на столешне; 3 – вытяжной зонт;
 4 – граница конвективной струи; 5 – зона свободного пространства струи;
 $h_{сп}$ – высота свободного пространства зонта

При построении схемы развития восходящего потока над горящими свечами рассматривались диаметр столешни на подсвечнике $D_{ист}=350$ мм, диаметр входного сечения зонта $D_{зон}=500$ мм, температура $t_{ос}$, скорость $v_{ос}$ воздуха на оси потока в центре всасывающего отверстия, размещение горящих свечей, диаметр шейки потока $d_{ш}$, полюс и лучи, ограничивающие границы потока и его участки I, II, III, IV, высота участков потока h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} , размещение вытяжного зонта на участках h_I , h_{II} , h_{III} со стабильными и устойчивыми параметрами $v_{ос}$ и $t_{ос}$ восходящего потока. Такое решение, принятое на основе экспериментальных и теоретических исследований, обеспечит высокую эффективность работы вытяжного зонта.

Полученные экспериментальные данные температуры $t_{ос}$ и скорости $v_{ос}$ воздуха на оси неизотермического восходящего потока от горящих свечей в виде схемы конвективного потока (см. рис. 6), графиков и профилей $t_{ос}^{\circ C}$, $v_{ос}$, м/с (рис. 7) в зоне свободного пространства вытяжного зонта подтверждают области устойчивых и стабильных значений температуры и скорости конвективного потока $h_{сп}$ от 400 до 500 мм.

Из анализа полученных данных следует, что максимальные значения осевой температуры $t_{ос}$, $^{\circ C}$ (рис. 7а) и скорости воздуха $v_{ос}$ (рис. 7б) в восходящем конвективном потоке над группой горящих свечей наблюдаются на высоте потока в зоне от 40 до 50 см, т.е. на высоте h_I , h_{II} , h_{III} (см. рис. 6). Следовательно, в зоне данного пространства имеет место устойчивый стабильный восходящий поток с максимальными значениями $t_{ос} = 63,8^{\circ C}$ и $v_{ос}=1,6$ м/с. Полученные экспериментальные данные (см. рис. 3, 4, 5) коррелируют с результатами исследований температуры и скорости восходящего

потока в виде графиков, приведенных на рис. 7а и 7б, а также согласуются со схемой модели потока на рис. 6. Полученные результаты подтверждают обоснованный выбор высоты установки зонта над подсвечником с горящими свечами.

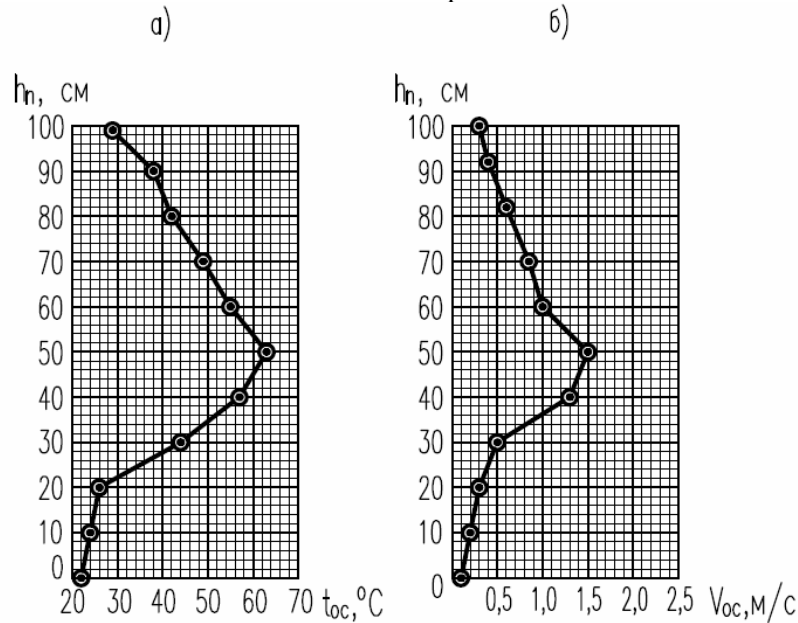


Рис. 7. Графики изменения осевой температуры t_{0c} , °C (а) и скорости воздуха v_{0c} , м/с (б) по высоте конвективного восходящего потока h_n , см, над группой горящих свечей на подсвечнике $n=100\%$ и без расположения зонта над подсвечником

В данной публикации авторами впервые приведены результаты экспериментальных исследований влияния количества сгораемых свечей на подсвечнике n , %, на параметры воздуха в потоке в зоне всасывания зонта $t_{cп}$, °C, $v_{cп}$, м/с, L_3 , м³/ч, $q_{cп}$, мг/м³, при $h_{cп} = 500$ мм. Полученные результаты приведены на рис. 8.

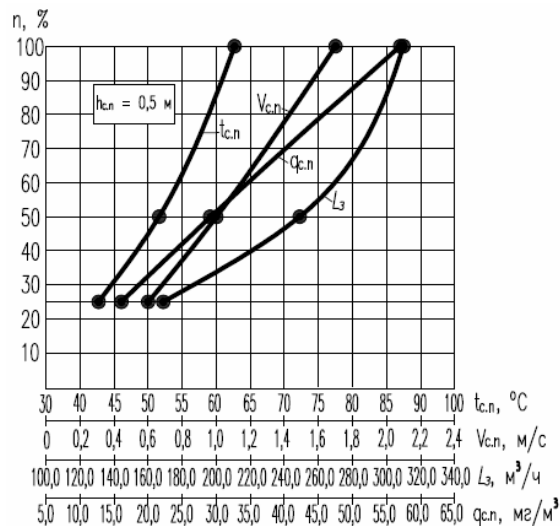


Рис. 8. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывающего отверстия зонта в зависимости от количества сгораемых свечей n , %, на подсвечнике:

$h_{cп}$ – высота свободного пространства; $v_{cп}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с; $t_{cп}$ – температура воздуха в зоне всасывания, °C; $q_{cп}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м³; L_3 – объем воздуха, удаляемого вытяжным зонтом, м³/ч

Анализ графиков, приведенных на рис. 8, позволяет сделать вывод, что с увеличением количества сжигаемых свечей на подсвечнике с 25 до 100 % интенсивно возрастает поступление теплоты в свободное пространство зонта при $h_{cп} = 500$ мм.

В результате архимедовой силы увеличивается импульс восходящего потока – это приводит к росту скорости $v_{\text{сп}}$, температуры $t_{\text{сп}}$ воздуха и увеличению объемной концентрации копоти и сажи $q_{\text{сп}}$, а также расхода удаляемого зонтом L_3 воздуха.

Данные измерения являются положительными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании эффективной местной системы вытяжной вентиляции с использованием зонтов для улавливания и удаления вредностей при сгорании свечей. В данном случае отрицательным фактором является рост объемной концентрации копоти и сажи в свободном пространстве, хотя они удаляются вытяжным зонтом.

В процессе экспериментальных исследований рассматривалось также влияние различных вариантов высоты установки вытяжного зонта над подсвечником $h_{\text{сп}}$ в пределах 300 мм, 400 мм, 500 мм на параметры воздуха в восходящем потоке в зоне свободного пространства зонта. Полученные результаты в виде графиков приведены на рис. 9.

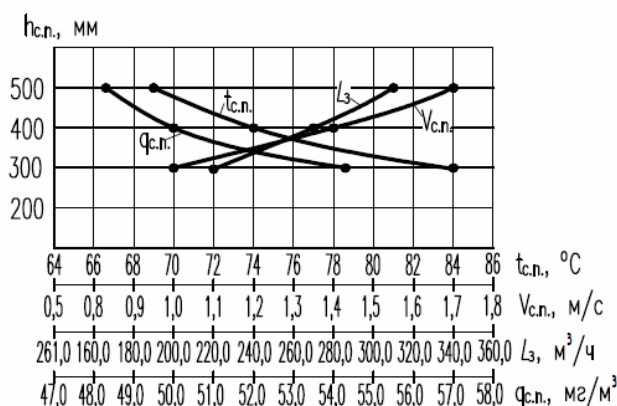


Рис. 9. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывания в зависимости от высоты установки $h_{\text{сп}}$, мм, зонта над подсвечником:

$v_{\text{сп}}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с; $t_{\text{сп}}$ – температура воздуха в зоне всасывания, $^\circ\text{C}$; $q_{\text{сп}}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м^3 ; L_3 – объем воздуха, удаляемого зонтом, $\text{м}^3/\text{ч}$

Впервые представленные авторами результаты (см. рис. 9) позволяют сделать вывод, что с увеличением $h_{\text{сп}}$ от 300 до 500 мм происходит значительный рост количества удаляемого зонтом воздуха L_3 , $\text{м}^3/\text{ч}$, и скорость воздуха в зоне всасывания зонта $v_{\text{сп}}$, м/с. В то же время установлено снижение температуры воздуха $t_{\text{сп}}$, $^\circ\text{C}$, и объемной концентрации копоти и сажи $q_{\text{сп}}$, мг/м^3 , в потоке за счет интенсивного подтекания (стока) из помещения воздуха в зону всасывания зонта. Следовательно, на основе представленных выше экспериментальных данных предлагается установить вытяжной зонт на высоте в пределах от $h_{\text{сп}} = 400$ мм до $h_{\text{сп}} = 500$ мм от верха подсвечника до нижней кромки зонта. Данная высота потока является свободным пространством $h_{\text{сп}}$, мм, вытяжного зонта, которое располагается на разгонном участке потока в зоне «шейки». Традиционные методы проектирования вытяжных зонтов для удаления вредностей не учитывают особенностей образования восходящего теплового потока от открытого пламени и горящих свечей в зоне свободного пространства зонта и высоты разгонного участка в зоне «шейки» потока. Техническое решение, с учетом данных исследований, обеспечит эффективную работу вытяжного зонта по локализации, улавливанию и удалению вредностей в процессе сгорания церковных свечей в местах их образования.

Параметры восходящего потока, технологические и конструктивные решения могут быть определены по эмпирическим формулам. Основываясь на полученных результатах исследований, высоту свободного пространства $h_{\text{сп}}$, мм, вытяжного зонта определяем в зависимости от диаметра подсвечника с горящими свечами по формуле

$$1,17D_{\text{ист}} \leq h_{\text{сп}} \leq 1,43D_{\text{ист}},$$

где $D_{\text{ист}}$ – диаметр подсвечника (источника) со свечами, см.

Диаметр «шейки» ($d_{ш}$, см) разгонного участка восходящего потока в зависимости от $D_{ист}$, см, рассчитываем по формуле

$$d_{ш} = 0,773 D_{ист}.$$

Диаметр входного отверстия круглого зонта $D_{зон}$, см, находим по формуле

$$D_{зон} = 0,5 h_{сп} + D_{ист}.$$

Для практических расчетов размеры сторон входного отверстия прямоугольного вытяжного зонта допускается определять с учетом $h_{сп}$, $D_{ист}$, площади всасывающего отверстия круглого зонта $A_{зон}$, m^2 , и площади источника $A_{ист}$, m^2 .

Результаты теоретических и экспериментальных исследований при высоте установки зонта над подсвечником 500 мм позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты анализа существующих методик расчета показали, что при проектировании зонтов, а именно при определении размеров и высоты установки зонта над источником с горящими свечами, не учитываются параметры температуры и скорости воздуха в восходящем потоке и образование «шейки» на разгонном участке потока из-за отсутствия исследований в данной области.

2. Впервые получены результаты исследований скоростных и температурных полей в зоне всасывания в зависимости от высоты установки зонта над источником теплоты и количества сгораемых свечей. Результаты необходимы для использования при проектировании местной механической вытяжной вентиляции для улавливания и удаления вредных в местах их образования при сгорании свечей из зала богослужения православных культовых сооружений.

3. На основе экспериментальных исследований впервые построены профили скоростных и температурных полей в поперечном сечении в зоне свободного пространства и плоскости всасывания зонта при высоте установки зонта над подсвечником $h_{сп}=500$ мм и различной заполняемости подсвечника горящими свечами – 25 %, 50 % и 100 %.

4. В результате сравнительного анализа полученных данных предлагается для эффективной локализации, улавливания и удаления вредных вытяжной зонт установить на участке разгона конвективного потока в зоне «шейки» с высокой стабильной и устойчивой скоростью и температурой воздуха на расстоянии от подсвечника $h_{сп}=400-500$ мм.

5. Впервые получены зависимости в виде графиков параметров температуры и скорости воздуха, количества воздуха, удаляемого зонтом, концентрации копоти и сажи в восходящем потоке от высоты установки зонта над подсвечником $h_{сп}$, мм, и количества сжигаемых церковных свечей n , %.

6. Предложены упрощенные эмпирические формулы для расчета высоты установки зонта над подсвечником $h_{сп}$, мм, определения диаметра зонта и диаметра «шейки» в зоне участка разгона потока.

Список литературы

1. Боровицкий, А.А. Исследования закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте / А.А. Боровицкий, С.В. Угарова // Актуальные проблемы современного строительства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С.55–58.
2. Еремкин, А.И. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 6. – С. 151–156.
3. Еремкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 195–202.

4. Еремкин, А.И. Инженерные системы поддержания микроклимата православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 1. – С. 87–91.
5. Еремкин, А.И. Совершенствование систем климатического обеспечения комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, Д.А. Трофимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 4. – С. 36–45.
6. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.
7. Eremkin, A.I. System of maintaining parameters of air conditioning in orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics, article 10.1088/1742-6596/1926/1/012025
8. Eremkin, A.I. Theoretical and experimental substantiation of the system of local removal of harmful substances during the combustion of candles in the worship hall of Orthodox churches and cathedrals, E3S Web of Conferences / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva.
9. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.
10. Рогова, Т.Н. Влияние турбулентной диффузии газов на расчет объемов удаляемого воздуха / Т.Н. Рогова // Мир транспорта. – 2006. – № 1. – С. 16–21.
11. Килин, П.И. Расчет и устройство вытяжных зонтов / П.И. Килин, Т.Н. Рогова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 71 с.
12. Позин, Г.М. Местная вытяжная вентиляция – самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении / Г.М. Позин // Инженерные системы. – 2008. – № 3. – С. 40–45.
13. Сотников, А.Г. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2. – С. 54–59.
14. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
15. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

References

1. Borovitsky, A.A. Studies of the laws of interaction of air flows in the exhaust hood / A.A. Borovitsky, S.V. Ugarova // Actual problems of modern construction: interuniversity. Sat. scientific tr. – SPb: SPbGASU, 2010. – P.55–58.
2. Eremkin, A.I. Influence of the sanitary-hygienic state of the microclimate in the worship halls of Orthodox cathedrals on the physiological state of the parishioners / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and science in the modern world. Innovations. – 2020. – No. 6. – P. 151–156.
3. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for the creation of local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 195–202.
4. Eremkin, A.I. Engineering systems for maintaining the microclimate of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova // Education and science in the modern world. Innovations – 2021. – No. 1. – P. 87–91.
5. Eremkin, A.I. Improving the systems of climatic support for comfortable conditions and the preservation of historical and cultural heritage in Orthodox religious buildings /

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, D.A. Trofimov // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2021. – No. 4. – P. 36–45.

6. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.

7. Eremkin, A.I. System of maintaining parameters of air conditioning in orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics, article 10.1088/1742-6596/1926/1/012025

8. Eremkin, A.I. Theoretical and experimental substantiation of the system of local removal of harmful substances during the combustion of candles in the worship hall of Orthodox churches and cathedrals, E3S Web of Conferences / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva.

9. Eremkin, A.I. A comprehensive solution for the localization of pollution during the combustion of church candles in Orthodox buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.

10. Rogova, T.N. Influence of turbulent diffusion of gases on the calculation of volumes of removed air / T.N. Rogova // Mir transporta. – 2006. – No. 1. – P. 16–21.

11. Kilin, P.I. Calculation and arrangement of exhaust hoods / P.I. Kilin, T.N. Rogova. – Ekaterinburg: UrGUPS, 2005. – 71 p.

12. Pozin, G.M. Local exhaust ventilation is the most efficient way to organize indoor air exchange / G.M. Pozin // Engineering Systems. – 2008. – No. 3. – P. 40–45.

13. Sotnikov, A.G. Theoretical and experimental substantiation of the method for optimizing air exchanges in industrial ventilation systems / A.G. Sotnikov, A.A. Borovitsky // Civil Engineering Journal. – 2012. – No. 2. – P. 54–59.

14. Taliev, V.N. Aerodynamic ventilation/ V.N. Taliev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 295 p.

15. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in the room / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.

УДК 519.87 : 697.956

DOI 10.54734/20722958_2023_3_180

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Кузина Валентина Владимировна**,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru**Ерёмкин Александр Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru**Кошев Александр Николаевич**,
доктор технических наук, профессо
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук
Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09**Пономарева Инна Константиновна**,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Kuzina Valentina Vladimirovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Information and computing
systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru**Eremkin Aleksander Ivanovich**,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru**Koshev Aleksander Nikolaevich**,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Information and computing
systems», Full member of the New York
Academy of Sciences
Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09**Ponomareva Inna Konstantinovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Information Support
Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ

В.В. Кузина, А.И. Ерёмкин, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева

Приводятся итоги исследований аэродинамических и диффузионно-конвективных потоков от точечных тепловых источников при сгорании церковных свечей, расположенных на подсвечнике в форме плоского круга или прямоугольника симметрично его центру в замкнутом пространстве зала богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе. В качестве источников горения рассматриваются церковные парафиновые и восковые свечи. Над каждым тепловым источником возникает интенсивный поток продуктов сгорания (копоть, сажа, углекислый газ и др.) определенной концентрации, параметры которого рассчитываются с применением методов математического моделирования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения чистоты воздуха и сохранности убранств в зале богослужения православных культовых сооружений.

Представлена математическая модель сферической диффузии технического углерода (копоти и сажи) без учета конвективной составляющей процесса. Адекватность полученных моделей подтверждена сравнением результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: тепловой источник, конвективный поток, диффузия, технический углерод, копоть, сажа, математическое моделирование, церковная свеча, зал богослужения

MATHEMATICAL MODELING OF DIFFUSIVE DISTRIBUTION OF CANDLE COMBUSTION PRODUCTS IN THE TEMPLE

V.V. Kuzina, A.I. Eremkin, A.N. Koshev, I.K. Ponomareva

The results of studies of aerodynamic and diffusive-convective flows from point heat sources during the burning of church candles located on a candlestick in a flat circle or rectangle symmetrically to its center in the enclosed space of the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza. Church paraffin and wax candles are considered as sources of combustion. An intensive flow of combustion products (soot, carbon dioxide, etc.) of a certain concentration appears above each thermal source, the parameters of which are calculated using mathematical modelling methods. The relevance of the study is due to the need to ensure the cleanliness of the air and the safety of the decorations in the worship hall of Orthodox places of worship.

The mathematical model of spherical diffusion and plane diffusion is presented without taking into account the convective component of the process. The adequacy of the obtained models is confirmed by comparing the calculation results with the experimental data.

Keywords: heat source, convective flow, diffusion, carbon black, soot, soot, mathematical modeling, church candle, worship hall

Исследование конвективных и других потоков воздуха в помещениях храмов и соборов проводится при решении задач климатизации с целью обеспечения чистоты воздуха вблизи источников выделения вредных веществ, при решении проблем сохранности историко-культурного наследия в виде убранства залов, при проектировании отопления, вентиляции и кондиционирования, а также при решении задач тепломассообмена, энергосбережения и др. Существуют различные экспериментальные методы и приборы для измерения фактических параметров микроклимата и определения концентрации вредных веществ в помещении и диффузионных процессов в конвективных потоках. Однако наиболее эффективным методом определения прогнозных характеристик является математическое моделирование [1–5].

Математическое моделирование процессов позволяет проводить исследования параметров аэродинамических потоков (температура, скорость и др.) и диффузии вредных веществ (концентрации и др.) с целью проектирования вентиляционного оборудования для улавливания и удаления загрязнений воздуха в виде копоти, сажи и др. от горящих свечей в местах их образования.

В работе [2] нами рассмотрены некоторые аспекты математического моделирования тепловых процессов, происходящих при горении свечей в ограниченном помещении (например в зале богослужения православного храма). Исследованы конвективные потоки.

Целью исследования являлось определение параметров диффузионных и конвективных потоков, исходящих от точечных источников в ограниченном замкнутом помещении, методами математического моделирования. В качестве примера таких источников выбраны церковные свечи, зажигаемые в залах богослужения православных культовых сооружений. Определялось влияние диффузионной составляющей (в частности микрочастиц копоти, сажи и углекислого газа) на конвективные процессы.

Анализ имеющихся отечественных и зарубежных исследований показывает, что проблеме обеспечения чистоты воздуха в помещении посвящено много работ. Описание экспериментальной установки, формулы для расчетов и результаты многофакторного эксперимента для исследования закономерностей диффузионного распространения вредных примесей вблизи газовыделяющего оборудования приводятся в статье [3]. В работе [4] представлены результаты исследования, которое проводилось с помощью электронно-числовой модели тепловоздушных потоков в здании с использованием программного комплекса *SolidWorks* с подпрограммой *Simulation*. В статье [5] предложен метод прогнозирования параметров микроклимата в помещениях зданий, предназначенных для длительного пребывания человека. Метод основан на математическом моделировании процессов тепломассообмена в программно-вычислительном комплексе *ANSYS Fluent*.

Многими авторами рассматривалась проблема отрицательного воздействия горящих свечей на убранство и комфортные условия для прихожан и персонала православных храмов. Выделяемые в процессе горения углекислый газ, копоть, сажа и др. оказывают негативное влияние на состояние воздуха в помещении, на загрязнение поверхностей убранства и, как следствие, на санитарно-гигиенические показатели воздушной среды и на эстетику интерьера.

Так, в статье [6] представлен анализ выделяющихся вредностей, а именно копоти и сажи, образующихся при сжигании церковных свечей, и приводится методика расчета воздухообмена для их ассимиляции. В работе [7] рассматриваются результаты экспериментальных исследований внешней и внутренней аэродинамики и ее влияния на теплообменные процессы, происходящие внутри храмов.

Процессы, формирующие тепловую обстановку помещения, как и процессы распределения вредных примесей в исследуемом пространстве, представляют собой процессы, которые связаны между собой и взаимное влияние которых может оказаться существенным.

Процесс горения можно рассматривать как химическую реакцию, характеризующуюся выделением теплоты и ее переносом в ограниченном или неограниченном пространстве, а также образованием продуктов горения и их конвективным и диффузионным перемещением. Процессы, происходящие в зоне реакции горения, определяются условиями теплопередачи, скоростью конвективного переноса и скоростью диффузии веществ, образующихся при горении церковных свечей.

При моделировании аэродинамических потоков от точечных тепловых источников в виде горящих церковных свечей, расположенных на подсвечнике в форме плоского круга или прямоугольника симметрично его центру (рис. 1) в замкнутом пространстве помещения, будем рассматривать: 1) поток конвективной диффузии, определяемый диффузией твердых микрочастиц и газов, образующихся при горении; 2) конвективный поток загрязняющих веществ (ЗВ), обусловленный движением воздуха, связанным с принудительной или естественной вентиляцией помещения.

Над каждым источником горения возникает интенсивный тепловой поток с продуктами сгорания определенной мощности, который схематично изображен на рис. 2.

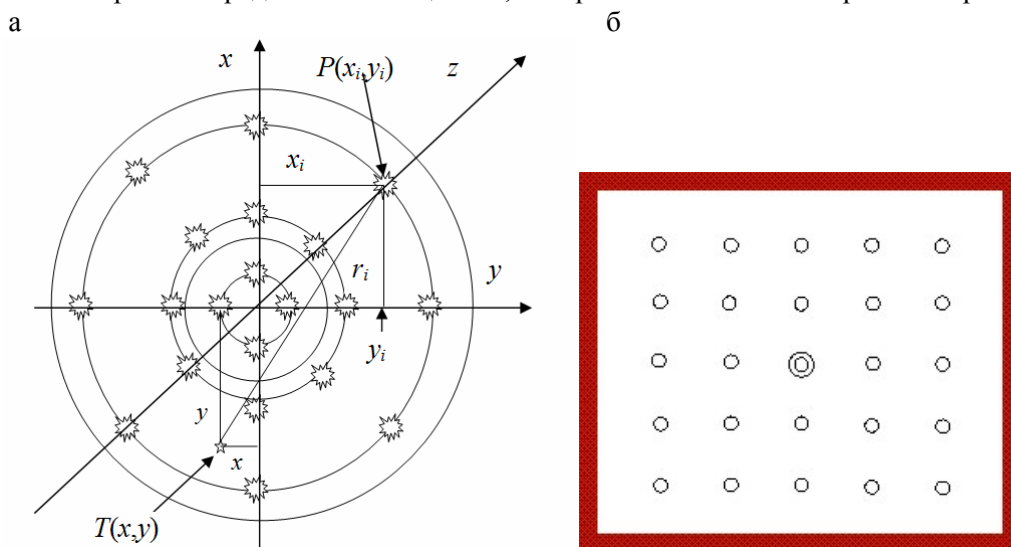


Рис. 1. Схематичное изображение точечных тепловых источников на подставке:

а – круглой, б – прямоугольной формы

Согласно теории, тепловые потоки и потоки массивных примесей от точечных тепловых источников без принудительной конвекции имеют круговую симметрию относительно вертикальной оси и обычно называются компактными. Однако при естественной или искусственной вентиляции потоки могут оказаться как симметричными (рис. 2, а), так и асимметричными (рис. 2, б).

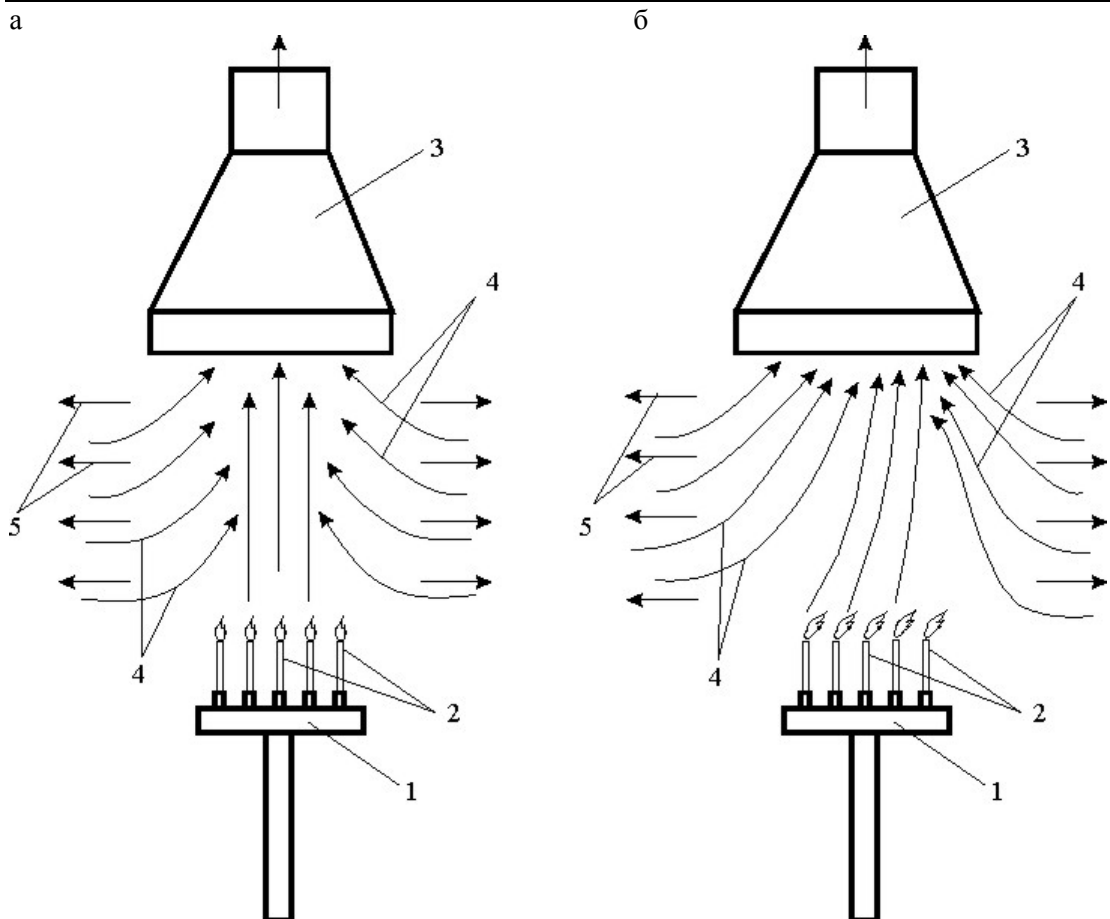


Рис. 2. Схематичное изображение конвективных и диффузионных потоков, создаваемых точечными тепловыми источниками:

а – симметричный; б – асимметричный потоки;

1 – подсвечник; 2 – горящие свечи; 3 – вытяжной зонтик; 4 – конвективные потоки;

5 – диффузионные потоки

Сведение трехмерной задачи к двумерной модели возможно, когда процессы, протекающие в параллельных плоскостях $z = \text{const}$, можно считать идентичными, что вполне соответствует многим ситуациям, реализуемым в практических условиях. При этом естественным предположением является малая величина источника горения в сравнении с пространственными размерами рассматриваемого помещения.

При расчете конвективных и диффузионных потоков вредных примесей представляется интересным рассмотреть три модели распространения веществ, образующихся при сгорании точечных тепловых источников от теплоты горящих свечей:

- сферическую диффузию углекислого газа и микрочастиц копоти и сажи из обобщенного точечного источника, за который принята вся столешница подсвечника с единичными источниками сгорания, размеры которой пренебрежимо малы по сравнению с размерами рассматриваемого пространства, окружающего источник;
- плоскую диффузию, когда распространение продуктов горения свечей в пространстве помещения происходит на некотором фиксированном участке;
- плоскую конвективную диффузию, при которой кроме диффузионной составляющей потока углекислого газа и микрочастиц копоти и сажи существенной является конвективная составляющая потока, обусловленная вертикальной или горизонтальной принудительной или естественной вентиляцией помещения.

Построение математических зависимостей процессов горения в точечных источниках в виде церковных свечей, собранных в малом ограниченном пространстве закрытого помещения, основано на классическом представлении о конвективной диффузии, т.е. совместных уравнениях переноса массы в движущемся потоке и урав-

нении молекулярной диффузии, вызванной градиентами парциальных концентраций ∇C , температуры ∇T и общего давления ∇p .

Известно, что распределение технического углерода (копоти и сажи) в ограниченном пространстве вследствие горения свечей в точечных источниках описывается в общем виде уравнением

$$\rho \frac{dC}{d\tau} = D\Delta C + J. \quad (1)$$

Здесь C – концентрация интересующего нас технического углерода (копоти и сажи), г/см³; τ – текущее время, с; ρ – плотность среды, г/см³; J – источник массы, г; D – коэффициент диффузии, см²/с; оператор Лапласа $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

Заметим, что источник массы может возникать в процессе фазовых или химических превращений. Отметим также, что эффектами термодиффузии и бародиффузии часто можно пренебречь в сравнении с диффузией, вызванной градиентами концентраций молекул рассматриваемых веществ в разных средах. Коэффициент D принимаем за постоянную величину.

В условиях отсутствия источников массы в других точках пространства, кроме источника горения церковных свечей, находящегося на границе области решения краевой задачи, уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = D\Delta C_i.$$

В дальнейшем индекс i для удобства записи будет нами опущен там, где это возможно, из-за универсальности уравнений и их преобразований.

В сферической системе координат имеем:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right),$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – радиус-вектор точки с координатами (x, y, z) .

Полученное уравнение преобразуем к виду

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}, \quad (2)$$

где $V(r, \tau) = rC(r, \tau)$.

Если в начале координат действует источник загрязнения окружающего пространства продуктами горения свечей постоянной мощности, выделяющий в единицу времени некоторое количество q загрязняющего вещества, очевидно, что во всех других точках окружающего пространства $r \neq 0$ начальная концентрация продуктов горения равна нулю, $C(r, 0) = 0$, а следовательно, и $V(r, 0) = 0$. Отметим, что это условие является начальным для уравнения (2). Граничное условие для функции $V(r, t)$ при $r = 0$ можно получить путем предельного перехода [8]: $V(0, \tau) = q/4\pi = V_0$.

Справедливо

$$V(r, \tau) = V_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r}{2\sqrt{D\tau}}}^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha.$$

Представив через интеграл вероятности $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha$, $z = \frac{r}{2\sqrt{D\tau}}$,

получим:

$$V(r, \tau) = V_0 \left[1 - \Phi \left(\frac{r}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right].$$

Распределение концентрации технического углерода или микрочастиц копоти и сажи вдоль радиуса сферы, окружающей источник горения с течением времени, определяется как:

$$C(r, \tau) = \frac{q}{4\pi r} \left[1 - \Phi \left(\frac{r}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] \quad (3)$$

или

$$C(r, t) = \frac{2q}{4\pi r \sqrt{\pi}} \int_{\frac{r}{2\sqrt{D\tau}}}^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) позволяют не только находить распределение концентрации продуктов горения, но и оценивать время, за которое искомые концентрации в точке помещения с координатой x станут больше предельно допустимых норм.

При расчете сферической диффузии продуктов горения свечей выбраны следующие значения: $q = 10^{-12}$ г/см³ – мощность источника сферической диффузии; $r = 5 \div 10$ см – расстояние от центра; $D = 0,1$ см²/с – коэффициент диффузии; $t = 0 \div 1800$ с – время (рис. 3).

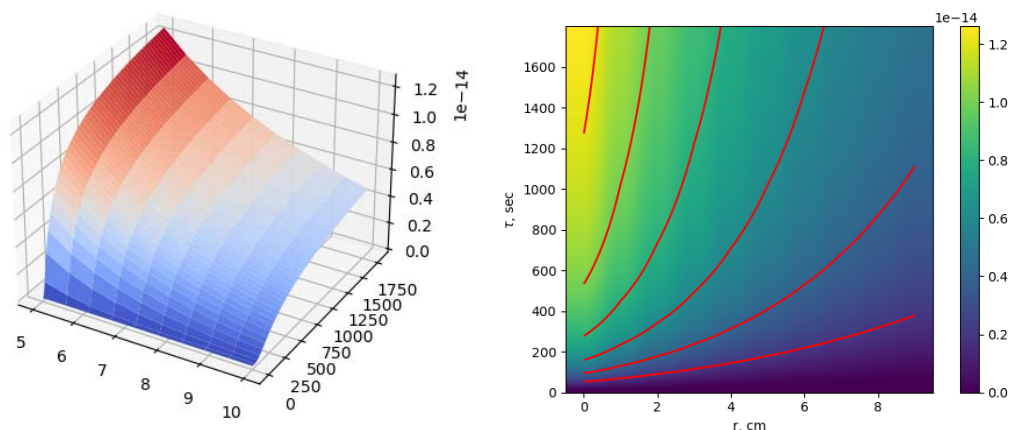


Рис. 3. Графики сферической диффузии продуктов горения

Анализируя результаты расчетов, можно в первую очередь отметить следующее:

- наблюдается существенно нелинейное снижение количества продуктов горения при увеличении расстояния от точки горения при заданном времени горения;
- наблюдаются существенно нелинейный рост количества продуктов горения при увеличении времени горения свечей при малом расстоянии от точки горения и приближение к линейной зависимости роста количества продуктов горения свечей от времени при увеличении расстояния от точки горения.

Список литературы

1. Кузина, В.В. Математическое моделирование процессов переноса пассивной примеси в ограниченном пространстве / В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4(33). – С. 133–141.
2. Кузина, В.В. Математическое моделирование распределения конвективного потока над компактно расположенными точечными тепловыми источниками / В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1(50). – С. 75–80.
3. Килин, П.И. Исследование закономерностей диффузионного распространения вредных примесей / П.И. Килин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 1(9). – С. 66–78.

4. Старкова, Л.Г. Оптимизация микроклимата в православном храме методом числового моделирования воздушных потоков / Л.Г. Старкова, Ю.А. Морева, Ю.Н. Новоселова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 53–59.
5. Пророкова, М.В. Математическое моделирование тепломассообмена в помещении для решения задач энергосбережения / М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. – Т. II. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 260–263.
6. Еремкин, А.И. Разработка и апробация методики расчета воздухообмена на основе определения концентрации сажи и копоти в воздухе при сгорании церковных свечей в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 119–127.
7. Кочев, А.Г. Внутренняя и внешняя аэродинамика православных храмов / А.Г. Кочев, М.М. Соколов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сб. науч. тр. РААСН. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. – С. 150–156.
8. Кузина, В.В. Математическое моделирование в задачах мониторинга состояния водной среды: моногр. / В.В. Кузина, А.Н. Кошев. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 144 с.

References

1. Kuzina, V.V. Mathematical Modeling of Passive Impurity Transfer Processes in Limited Space / V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional Architecture and Engineering. – 2017. – № 4(33). – P. 133–141.
2. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of convective flow distribution over compactly located point heat sources / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – № 1(50). – P. 75–80.
3. Kilin, P.I. Research of regularities of diffusion distribution of harmful impurities / P.I. Kilin // Bulletin of the Ural State University of Railway Transport. – 2011. – № 1(9). – P. 66–78.
4. Starkova, L.G. Optimization of Microclimate in an Orthodox Church by Numerical Modeling of Airflows / L.G. Starkova, Y.A. Moreva, Y.N. Novoselova // Series «Construction and Architecture». – 2018. – Vol. 18, № 3. – P. 53–59.
5. Prorokova, M.V. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the room to solve the problems of energy conservation / M.V. Prorokova, V.V. Bukhmirov // Proceedings of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference. – Vol. II. – Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University V.I. Lenin, 2019. – P. 260–263.
6. Eremkin, A.I. Development and testing of methods for calculating air exchange based on determining the concentration of soot and soot in the air when burning church candles in Orthodox places of worship / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva // Privolzhsky Scientific Journal. – 2022. – № 2. – P. 119–127.
7. Kochev, A.G. Internal and external aerodynamics of orthodox temples / A.G. Kochev, M.M. Sokolov // Fundamental, search and applied research RAASN on scientific support development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2021: collection of scientific papers RAASN. – M.: Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 2022. – P. 150–156.
8. Kuzina, V.V. Mathematical Modeling in the Problems of Water Environment Monitoring: monograph / V.V. Kuzina, A.N. Koshev. – Penza: PSUAC, 2014. – 144 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 27–523:721.01:94(470.345)

DOI 10.54734/20722958_2023_3_187

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

National Research Mordovia State University

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68,
тел.: (8342) 47-71-56

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Марьёнкин Алексей Валерьевич,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: alexeymaryonkin@gmail.com

Maryonkin Aleksey Valerevich,
Postgraduate student of the Department
«Building Materials and Technologies»
E-mail: alexeymaryonkin@gmail.com

Окуньков Евгений Александрович,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: zhenek.okunkov@bk.ru

Okunkov Evgeny Aleksandrovich,
Postgraduate student of the Department
«Building Materials and Technologies»
E-mail: zhenek.okunkov@bk.ru

Родин Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Rodin Aleksander Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building materials and
technologies»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВИ КАЗАНСКОЙ ИКОНЫ БОЖИЕЙ МАТЕРИ С. ЧЕБЕРЧИНО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

А.В. Марьёнкин, Е.А. Окуньков, А.И. Родин

Представлены особенности церковной архитектуры XVIII в. на примере церкви Казанской иконы Божией Матери с. Чеберчино Республики Мордовия. Особое внимание уделено экстерьеру здания, его внутреннему убранству, а также композиции пространства. На основании результатов исследовательской работы предложена концепция реставрации объекта культурного наследия регионального значения.

Ключевые слова: православные храмы, Мордовия, архитектура, фасад, реконструкция, архитектурная композиция

ARCHITECTURE OF THE CHURCH OF THE KAZAN ICON OF THE MOTHER OF GOD IN THE VILLAGE OF CHEBERCHINO IN THE REPUBLIC OF MORDOVIA

A.V. Maryonkin, E.A. Okunkov, A.I. Rodin

The features of the church architecture of the XVIII c. on the example of the Kazan icon of the mother of the God in the village of Cheberchino of the Republic of Mordovia are presented. Special attention is paid to the exterior of the building, its interior decoration, and the composition of the space. Based on the research, the concept of restoration of the object of cultural heritage of regional significance is proposed.

Keywords: orthodox churches, Mordovia, architecture, facade, reconstruction, architectural composition

Православные храмы долгое время считались наиболее монументальными, возвышенными и красивыми постройками российской провинции. Лишь немногие из церквей не становились архитектурными символами своего населенного пункта. Особое место в контексте архитектурного наследия занимают сельские церкви, поскольку они всегда являлись доминантой и ядром застройки. Церковь имела главное значение в жизни общества того или иного села. В связи с политикой после Октябрьской революции 1917 года, направленной на отрицание религии, большинство храмов потерпело ущерб. Обращаясь к статистике, стоит отметить, что в начале XX века на территории Мордовии насчитывалось около 640 церквей, однако на данный момент число действующих храмов сократилось до 260, причем около трети из них находится в аварийном состоянии [1].

Для анализа тенденций строительства православных церквей того исторического периода следует углубиться в историю церковного зодчества мордовского края. Свое начало оно берет во второй половине XVII века, когда на территории начинали строить деревянные клетские церкви. Спустя некоторое время, приблизительно в середине XVIII века, доминирующим материалом становится кирпич, с помощью которого возводили церковные здания в стиле барокко, затем в стиле классицизм. Нами изучены архитектурные особенности классицистической церкви, построенной в 1798 г. в селе Чеберчино Симбирской губернии (ныне Дубёнского района Республики Мордовия) [2].

Данное село было заложено в начале XVII века. Ещё Петр I отдал во владение фельдмаршалу Александру Румянцеву это имение, однако до него село Чеберчино было собственностью А.В. Кикина. Александр Румянцев был не только сподвижником Петра I, но и отцом полководца, вошедшего в историю России. Ключевую роль в архитектурной застройке села играет церковный ансамбль, который был построен за счёт финансовых вложений сына полководца – Н.П. Румянцева [3].

Церковный ансамбль состоит из трёх объектов: Казанской церкви, мавзолея и церкви во имя Архистратига Михаила. Он располагается в центре села на площади трапезиевидной формы (рис. 1). Основываясь на планах, можно сделать вывод, что её окончательная планировка сформировалась к XIX веку, на что определенное влияние оказала церковь Казанской иконы Божией Матери. Ранее ансамбль дополняла трёхъярусная колокольня, завершенная главкой, однако она была полностью разрушена. Она замыкала все перспективы подъездов к селу. Казанская церковь и мавзолей имеют общую восточно-западную ось. Застройка села Чеберчино базировалась на архитектурной доминанте ансамбля.



Рис. 1. Ситуационная схема расположения церкви

Данный архитектурный ансамбль обладает высокими художественными достоинствами и является показательным примером единого стилистического решения в формах русского классицизма (рис. 2). Помимо стиля, постройки объединяют и функциональные связи, и интерпретации образов отдельных сооружений. Они предстают монументальными, замкнутыми по организации объектами. Основываясь на объемно-пространственных решениях и плановой структуре, а также декоре, можно предположить, что отношение к разработке церкви и мавзолея имел профессиональный архитектор. Подчиненную роль в ансамбле играет теплая церковь, построенная во имя Архистратига Михаила во второй половине XIX века. Она имеет небольшие размеры, скромный фасадный декор. Её возведение было обусловлено возникшей потребностью в зимней церкви для прихода малых масштабов, но главенствующим объектом всё также являлась церковь Казанской иконы Божией Матери.

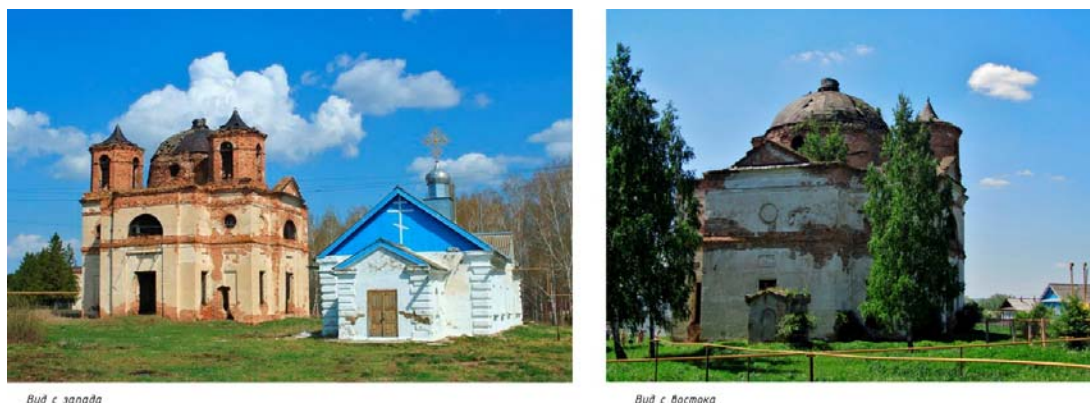


Рис. 2. Фотофиксация церкви. Фотографии авторов, 2022 г.

Она сделана из кирпича, отличается развитым планом и общим абрисом в виде креста. В восточную ветвь лаконично вливается полуциркулярная апсида. Из-за такой организации сформировались угловые ячейки, находящиеся между наружными стенами восточной части «креста» и апсидой. Они играют соединительную роль между жертвенником, дьяконником и алтарем. Полукупольный квадрат выделяется за счет четырех массивных пилонов и приставных полуоконников. Все рукава креста, кроме восточного, оснащены небольшими по размеру центральными ризалитами. В интерьере данные участки плана криволинейны (рис. 3).

Особое внимание следует уделить объемно-пространственной композиции, стилистическим особенностям Казанской церкви, которые были подробно проанализированы В.Б. Махеевым [4; 5]. Объемная композиция церкви довольно редка, она относится к типу классицистических церквей, имеющих две колокольни. Низкая ротонда с полусферой купола дополняет и создаёт баланс в совокупности с массивным крестообразным объемом. Колокольни также имеют важные особенности, на которые стоит обратить внимание. Они возведены в виде восьмериков. Помимо этого, колокольни имеют воронкообразные завершения, которые возвышаются над западной частью основного объема церкви. Их арочные проемы находятся в гранях, а горизонтальная тяга в скошенных гранях отмечает пяты арочных перемычек звонов.

Церковь имела строгий фасадный декор и качественную проработку отдельных деталей. Некая «обедненность» декора имеет логичное объяснение: храм возводился местными мастерами в условиях малого финансирования. Имеются предположения, что реализация проекта фасада отличалась от первоначальной задумки архитектора. Декоративное убранство ротонды, логически завершенной куполом, практически не сохранилось. По тому же принципу расположены арочные проемы в колокольнях. Судя по останкам ротонды, в ее верхней части проходил карниз, состоящий из трёх частей. Для данного храма характерна симметрия, а также центрический характер. На центральной оси фасада расположен дверной проём. В то же время на уровне окон по всему периметру фасадов проходит горизонтальная тяга. Боковые части фасада также

имеют проемы прямоугольной формы с филенками, западающими над ними. Во втором свете имеются круглые медальоны, которые заменены окнами аналогичной формы на фасаде с западной стороны. Интерьер храма был традиционно светлым и просторным, что подчеркивалось качественным освещением [6].

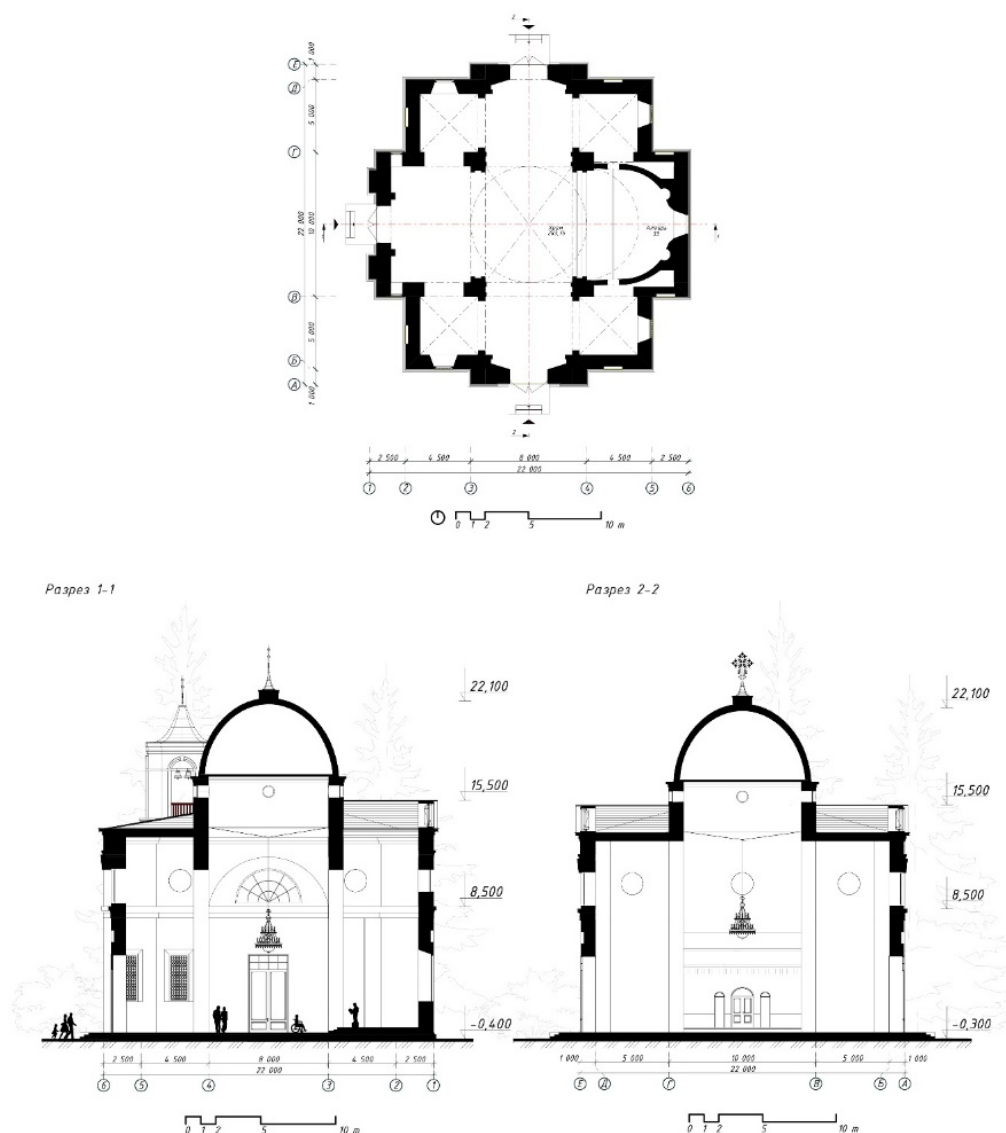


Рис. 3. Марьёнкин А.В. План, разрезы 1-1 и 2-2 церкви по результатам обмера

Цоколь церкви выделяется благодаря уступу стены. Касательно интерьера стоит отметить, что декоративное убранство самого здания было достаточно пышным и нарядным, что вызывает особый интерес, учитывая исторический контекст и территориальное расположение постройки. Цветом зодчие подчеркнули значимые детали декора, чтобы они выделялись на фоне стен. К сожалению, в настоящий момент цвет этих элементов полностью утрачен, однако на основании ряда данных и исследовательской работы можно предположить, что полуколонны с композитными капителями коринфского ордера были синего цвета. Так, все элементы церкви воздействуют на посетителей, давая им ощущение возвышенности и близости к сакральному.

К востоку от церкви находится мавзолей, выполненный из белого камня. Он имеет прямоугольную форму, а ближе к цокольной части здания идёт расширение. Внутри здания имеется перекрытие полуциркульным сводом. Грани лицевого фасада имеют завершенность в виде акротериев, а боковые фасады украшены каннелюрами, которые

делают акцент на монументальности постройки. С западной стороны располагается вход, где сохранились не только прочная перемычка, но и полотнища дверей начала XIX века, выполненные из чугуна. В интерьере склепа декор отсутствует. Исключением являются полуциркульные ниши, которые находятся в центре южной, северной и восточной граней. Саркофаг также отсутствует. Мавзолей является не только ценным примером мемориальной архитектуры XIX века, но и важным элементом церковного ансамбля села Чеберчино [7].

К сожалению, со временем ввиду внешних факторов храм лишилась кровли, декора фасадов в некоторых местах, а также внутреннего убранства. Прекращение работы церкви было обозначено в административном деле: в соответствии с протоколом её закрытие пришлось на 11 марта 1930 года. Реставрация церкви долгое время не проводилась в связи со значительным сокращением населения, а также с нехваткой необходимых для восстановления средств [8].



Рис. 4. Марьёнкин А.В., Окуньков Е.А. Эскизный проект восстановления церкви

Как выяснил В.Б. Махаев, ансамбль центра села Чеберчино является одним из самых ценных в Республике Мордовия объектов культурного наследия, находящимся в неудовлетворительном состоянии [9; 10]. Поэтому на данный момент остро встал вопрос реставрации храмов – памятников архитектуры и истории, отражения духовного наследия страны и религиозного опыта русского народа. Восстановление подобных объектов – это и ответственность, и моральный долг современного социума,

в частности архитекторов В Республике Мордовия прослеживается тенденция восстановления памятников церковного зодчества. Сегодня Казанская церковь пребывает в заброшенном и полуразрушенном состоянии, но здание всё ещё подлежит восстановлению. В связи с этим нами предложен эскизный проект реставрации Казанской церкви в селе Чеберчино (рис. 4).

Основная задача реставрации – воссоздание полного образа церкви, который будет визуально считываться посетителями и жителями села как архитектурная доминанта. Выбор цветового решения, в котором будут выполнены фасады здания, не имеет строгих рамок или правил, поэтому по результатам исследовательской работы предлагается использовать светло-зелёный оттенок. Для контрастности и цветовой завершенности и гармоничности проекта купольную часть церкви можно выполнить в темных оттенках. Объемно-планировочные решения основываются на исторических данных, а также на композиционно-стилистическом анализе ансамбля. Для прочности и устойчивости конструкций предлагается использовать современные строительные материалы, однако следует учитывать их совместимость с исходными материалами церкви, которые дошли до наших дней. Важную часть в предложенном проекте реставрации играет благоустройство прилегающих к храмам территорий. Так, комфортное пользование объектом религиозного назначения будет начинаться с транзитной зоны.

Подводя итоги, следует отметить, что анализ истории территории, а также тенденций храмового зодчества определенного исторического периода, в который был построен архитектурный ансамбль в селе Чеберчино, в частности Казанская церковь, играет важную роль в разработке концепции восстановления данного памятника истории.

Список литературы

1. Бахмутов, С.Б. Храмы Мордовии: справочник / С.Б. Бахмутов. – Саранск: Издатель К. Шапкарин, 2015. – С. 71–72.
2. Архивная справка от 06.10.2020 №386m // Министерство культуры, национальной политики и архивного дела Республики Мордовия.
3. Паспорт объекта «Казанская церковь» № 1300175001 // Министерство культуры СССР.
4. Махаев, В.Б. Ансамбль усадебных храмов в селе Чеберчине / В.Б. Махаев // Центр и периферия. – 2022. – № 3. – С. 61–67.
5. Махаев, В.Б. Классическая архитектура православных церквей мордовского края / В.Б. Махаев // Актуальные вопросы строительства. Материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Саранск: Издательство Мордовского ун-та, 2007. – С. 165–180.
6. Баженова, Н.И. Статистическое описание соборов, монастырей, приходских и домовых церквей Симбирской епархии по данным 1900 года / Н.И. Баженова. – Симбирск, 1903.
7. Отчий край / А.В. Клеянкин. – Саранск: Мордов. кн. изд-во, 1983.
8. Паспорт объекта «Мавзолей Казанской церкви» № 1300175002 // Министерство культуры СССР.
9. Махаев, В.Б. Греческий проект Екатерины Великой и усадебный ансамбль в Чеберчино / В.Б. Махаев // Странник. – 2020. – № 6. – С. 160–168.
10. Махаев, В.Б. Ардатовская епархия: от прошлого к настоящему: монография / В.Б. Махаев [и др.]. – Саранск: Издатель К. Шапкарин, 2021. – С. 327–334.

References

1. Bakhmustov, S.B. Temples of Mordovia: guide / S.B. Bakhmustov. – Saransk: Publisher K. Shapkarin, 2015. – P. 71–72.
2. Archival reference: dated 06.10.2020 No. 386m // Ministry of Culture, National Policy and Archival Affairs of the Republic of Mordovia.

3. Passport of the Kazan Church object No. 1300175001 // Ministry of Culture of the USSR.
4. Makhaev, V.B. Ensemble of manor temples in the village of Cheberchina / V.B. Makhaev // Center and periphery. – 2022. – No. 3. – P. 61–67.
5. Makhaev, V.B. Classical architecture of Orthodox churches of the Mordovian region / V.B. Makhaev // Actual issues of construction. Materials of the International Scientific and Technical Conference: in 2 p. Part. 1. – Saransk: Publishing House of the Mordovian University, 2007. – P. 165–180.
6. Bazhenova, N.I. Statistical description of cathedrals, monasteries, parish and house churches of the Simbirsk diocese according to the data of 1900 / N.I. Bazhenova. – Simbirsk, 1903.
7. Fatherland / A.V. Kleyankin. – Saransk: Mordovia publishing House, 1983.
8. Passport of the object «Mausoleum of the Kazan Church» No. 1300175002 // Ministry of Culture of the USSR.
9. Makhaev, V.B. The Greek project of Catherine the Great and the manor ensemble in Cheberchino / V.B. Makhaev // Wanderer. – 2020. – No. 6. – P. 160–168.
10. Makhaev, V.B. Ardatov Diocese: from the past to the present: monograph / V.B. Makhaev [et al.]. – Saransk: Publisher K. Shapkarin, 2021. – P. 327–334.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гречишкин Александр Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106,
тел. (4752) 63-10-19; факс: (4752) 63-06-43

Антонов Александр Иванович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура
и градостроительство»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Леденев Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Городское строительство и
автомобильные дороги»
E-mail: ledvi46@yandex.ru

Путинцева Анастасия Александровна,
доцент кафедры «Архитектура и
градостроительство»
E-mail: anastas_84@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grechishkin Aleksander Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Urban development
and architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Tambov State Technical University

Russia, 392000, Tambov, 106, Sovetskaya St.,
tel.: (4752) 63-10-19; fax: (4752) 63-06-43

Antonov Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Architecture and Urban
Planning»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Ledenev Vladimir Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Urban development and
Highways»
E-mail: ledvi46@yandex.ru

Putintseva Anastasia Aleksandrovna,
Associate Professor of the department
«Architecture and Urban Planning»
E-mail: anastas_84@mail.ru

ОТРАЖЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ ШУМ НА ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ С МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКОЙ

А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, В.И. Леденев, А.А. Путинцева

Предлагается методика расчета отраженного шума на территории малоэтажной примагистральной территории на базе усредненного коэффициента проникновения шума, который определяется плотностью застройки и параметрами зданий. Метод расчета отраженного шума основан на принципе вероятностного моделирования распространения цилиндрических звуковых волн от линейных источников транспортного шума. Сравнение измеренных и рассчитанных уровней шума показало достаточную точность предлагаемой методики и возможность ее использования для проектирования средств снижения шума в примагистральной застройке.

Ключевые слова: малоэтажная застройка, транспортный шум, расчет шумового поля, методика, отраженный звук

REFLECTED TRAFFIC NOISE IN A ADJACENT HIGHWAY AREA WITH LOW-RISE BUILDINGS

A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, V.I. Ledenev, A.A. Putintseva

A method is proposed for calculating reflected noise on the territory of a low-rise highway area based on the average noise penetration coefficient, which is determined by the building density and building parameters. The method for calculating reflected noise is based on the principle of probabilistic modeling of the propagation of cylindrical sound waves from linear sources of transport noise. Comparison of the measured and calculated noise levels has showed sufficient accuracy of the

proposed method and the possibility of its use for designing noise reduction facilities in the adjacent highway buildings.

Keywords: low-rise buildings, traffic noise, noise field calculation, methodology, reflected sound

Введение. Зашумление примагистральной территории происходит в результате непосредственного прихода на территорию застройки прямого звука от транспортной магистрали и образования отраженной составляющей шума вследствие многократных отражений звука от поверхностей зданий и от других находящихся на территории объектов [1]. В настоящее время расчёт прямого звука выполняется по стандартной методике, изложенной в нормативной литературе [2]. Однако расчёт отраженной составляющей шума представляет более сложную и трудоемкую задачу.

Формирование звукового поля на примагистральной территории застройки представляет собой сложный процесс, зависящий от параметров зданий, их этажности, размеров в плане, расположения относительно друг друга и транспортной магистрали. При автоматизированном проектировании средств снижения транспортного шума применяются компьютерные программы, реализующие методы расчёта прямого и отраженного звука различной сложности [3]. В отдельных программных продуктах при расчёте отраженного шума используются методы геометрической акустики, в частности метод прослеживания лучей [4]. Как показывает практика, программы имеют сложные алгоритмы, требуют большей трудоемкости при подготовке исходных данных и выполнении расчетов, поэтому учёт в них отраженной составляющей осуществляется по упрощенным методикам в виде добавок к уровням прямого звука [2].

В многоэтажной застройке определение отраженного шума производится, как правило, на территории, ограниченной относительно небольшим количеством больших зданий. В малоэтажной застройке на такой же территории могут находиться десятки сооружений различных размеров и пропорций. В этой связи методики, ориентированные на расчет отраженного звука в многоэтажной застройке, не могут эффективно использоваться для расчета шума на территории с застройкой из многочисленных малоэтажных зданий. В статье предлагается достаточно простой метод расчета шума на территории с малоэтажной застройкой, учитывающий параметры застройки, определяющие условия формирования отраженного шума.

Теоретический анализ. Шум от дороги представляется в виде последовательности распространяющихся цилиндрических волн. Интенсивность прямого звука в этом случае при отсутствии застройки определяется выражением

$$I_{\text{пр}} = \frac{W}{\pi r}, \quad (1)$$

где W – погонная акустическая мощность дороги как линейного источника шума, Вт/м; r – расстояние от дороги до расчетной точки, м.

Примагистральная застройка считается рядовой, когда здания образуют линии, параллельные дороге. Каждый ряд зданий пропускает в глубь застройки только часть прямого звука β . Методика расчета интенсивности проходящего звука через эшелон застройки дана в нормативной литературе [2]. Величина проникающей звуковой энергии определяется суммарным углом видимости участков дороги из расчетной точки. Однако применение этой методики в случае малоэтажной застройки затруднено из-за большого количества построек, имеющих при этом разнообразные геометрические параметры.

Для упрощения расчета прямого и отраженного звука в малоэтажной застройке предлагается использовать усредненный коэффициент прохождения звука через ряд малоэтажных построек β , полученный нами на основе анализа и статистической обработки расчетных данных и определяемый согласно [5] по формуле

$$\beta = 0,612 \frac{a}{a+b} - 0,152 \frac{c}{a}, \quad (2)$$

где a – средняя длина просветов между зданиями; b , c – средние значения длины и ширины зданий.

Интенсивность прямого звука, проходящего через несколько рядов застройки, в этом случае рассчитывается по выражению

$$I_{\text{пр}} = \frac{W\beta^N}{\pi r}, \quad (3)$$

где N – количество рядов застройки на пути распространения звука до расчетной точки.

Ряд зданий, или эшелон застройки, оказывает влияние на интенсивность поступающей звуковой энергии $I_{\text{пад}}$, которая разделяется на проходящую $I_{\text{про}}$, поглощенную $I_{\text{пог}}$ и отраженную $I_{\text{отр}}$:

$$I_{\text{пад}} = I_{\text{про}} + I_{\text{пог}} + I_{\text{отр}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{про}} = I_{\text{пад}} \beta$; $I_{\text{пог}} = I_{\text{пад}} \alpha(1 - \beta)$; $I_{\text{отр}} = I_{\text{пад}} (1 - \alpha)(1 - \beta)$; α – средний коэффициент звукопоглощения фасадов зданий.

При первых актах встречи звуковой волны с застройкой интенсивность поступающей энергии равна интенсивности прямого звука $I_{\text{пад}} = I_{\text{пр}}$. Баланс энергии, записанный в выражении (4), обеспечивается при каждом взаимодействии проходящей или отраженной энергии со следующим эшелоном застройки.

Расчет энергии от падающих, проходящих и отраженных отдельных цилиндрических звуковых волн, а также от суммы всех волн можно производить непосредственно по выражениям (3)–(4). В случае двух эшелонов застройки на территории итоговые выражения для интенсивности шума имеют простой вид. Расчетная схема для примагистральной застройки, состоящей из двух рядов зданий, приведена на рис. 1, где стрелками черного цвета показан прямой звук, проникающий на территорию застройки через здания первого и второго эшелонов. Цветные стрелки изображают отраженный звук 1–6-го порядков отражения.

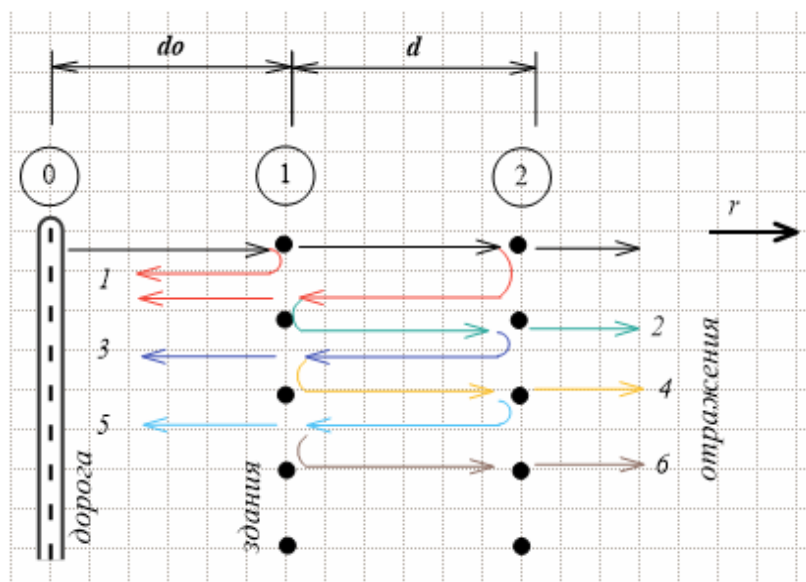


Рис. 1. К расчету звука на примагистральной территории с двумя рядами застройки

Значения интенсивности нескольких составляющих звука приведены на рис. 2. В значениях интенсивности звука учтен цилиндрический характер распространения звуковых волн. Верхний индекс в обозначениях интенсивностей указывает на количество встреч волны с рядами зданий, нижние индексы – на направление движения волны от соответствующего номера ряда в сторону другого ряда, к дороге (индекс «д») или по территории за застройкой (индекс «т»). Принятые обозначения на рисунке позволяют проследить траекторию движения волны, двигаясь от конечного положения

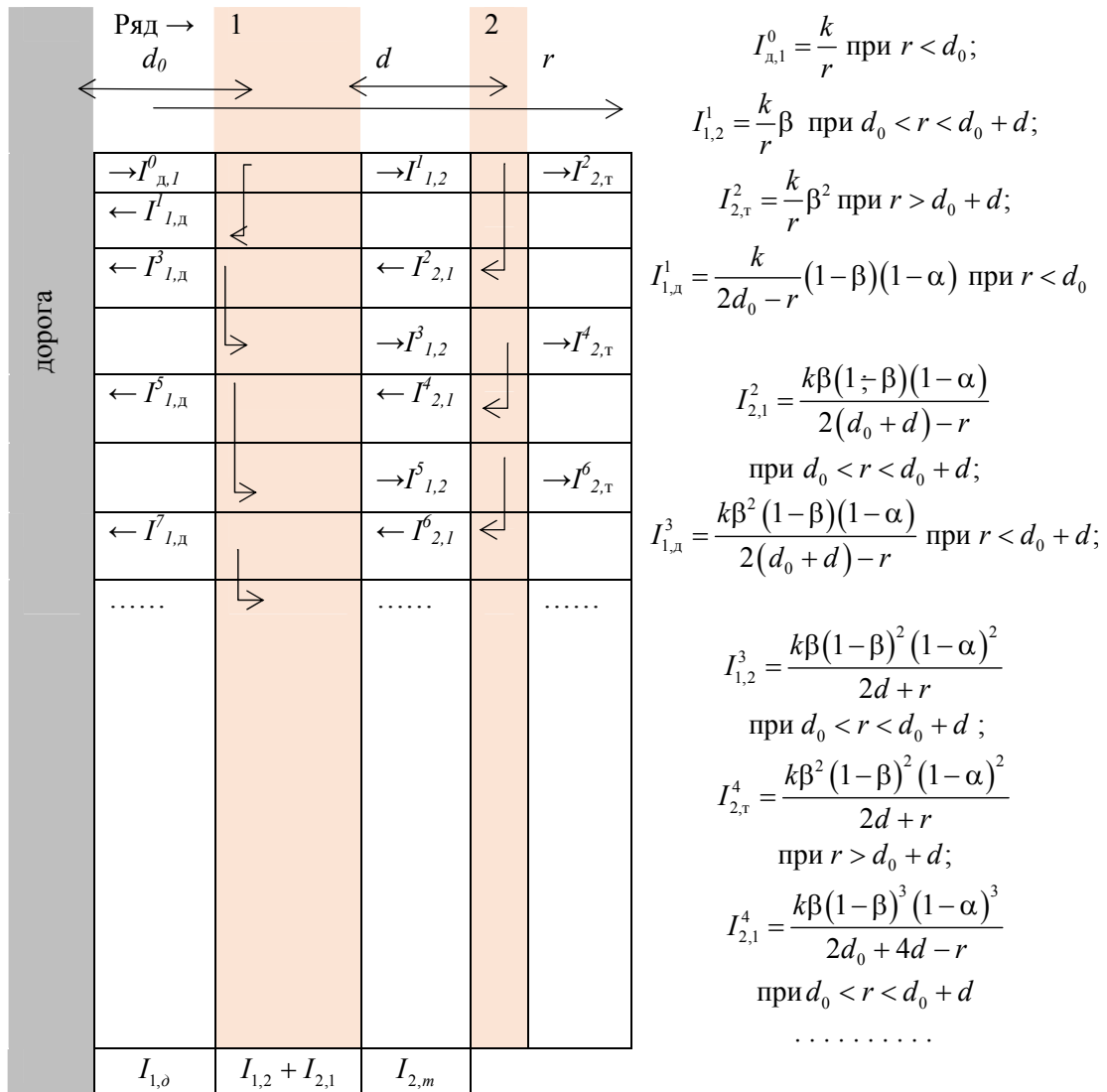


Рис. 2. Компоненты интенсивности отраженного звукового поля, образованные на примагистральной территории из двух эшелонов застройки; $k = W/\pi$

Суммарная интенсивность звука представляется в виде рядов:

- для звука между дорогой и застройкой

$$I_{n,1}^0 + I_{1,n} = \frac{k}{r} + \frac{k(1-\beta)(1-\alpha)}{2d_0 - r} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k\beta^2(1-\beta)^{i+1}(1-\alpha)^{i+1}}{2(d_0 + id) - r}; \quad (5)$$

— для звука между рядами застройки

$$I_{1,2} + I_{2,1} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{k\beta(1-\beta)^{2i}(1-\alpha)^{2i}}{2id+r} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k\beta(1-\beta)^{2i-1}(1-\alpha)^{2i-1}}{2(d_0+id)-r}; \quad (6)$$

– для интенсивности звука, прошедшего два ряда малоэтажной застройки

$$I_{2,r} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{k\beta^2(1-\beta)^{2i}(1-\alpha)^{2i}}{2id+r}. \quad (7)$$

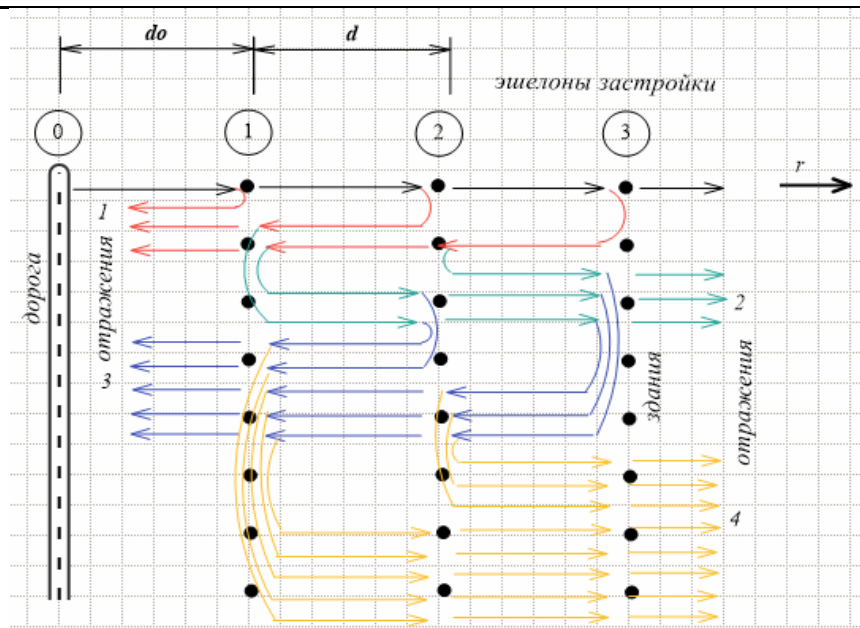


Рис. 3. Схема образования отраженного звука (1–4-го порядков) на примыкательной территории с тремя рядами застройки

Выражения (5)–(7) предназначены для расчета звукового поля при наличии двух рядов застройки. При количестве эшелонов застройки больше двух возрастают порядок математических рядов и сложность их расчета. Увеличение сложности расчетов связано с необходимостью независимого прослеживания звуковых волн, количество которых возрастает при каждом акте взаимодействия волны с рядом зданий (см. рис. 3). По этой причине ниже предлагается более простая методика расчета отраженного шума в малоэтажной застройке.

Методика расчета отраженного транспортного шума. Для упрощения расчетов в этом случае рекомендуется использовать принцип вероятностного моделирования. Принцип расчета отраженного шума заключается в следующем.

Шум от дороги представляется в виде последовательности цилиндрических волн. В связи с высокой производительностью современной вычислительной техники количество этих волн может быть значительным (несколько тысяч). Интенсивность каждой волны падает пропорционально пройденному расстоянию (см. выражение (1)). В момент встречи с эшелоном застройки волна или проходит через ряд зданий, или отражается от них и меняет направление движения на противоположное. Прохождение или отражение волны определяется вероятностным способом на основе сравнения случайного числа $\hat{X} \in \{0...1\}$ с коэффициентом прохождения шума β , определяемым по формуле (2). В случае отражения ($\hat{X} > \beta$) волна меняет направление движения на противоположное, а ее энергия уменьшается на множитель $(1 - \alpha)$ за счет звукопоглощающих свойств зданий и сооружений застройки. В случае ($\hat{X} < \beta$) волна проходит через ряд зданий застройки. Распределение суммарной прошедшей, поглощенной и отраженной энергии большого количества звуковых волн, встретившихся с эшелоном застройки, будет соответствовать выражению (4).

Путь звуковых волн прослеживается до тех пор, пока они не покинут пределы застройки или их энергии не уменьшатся на 60 дБ (в 10^6 раз). Принцип расчета прямого и отраженного шума на основе вероятностного моделирования показан на рис. 4. Отношение интенсивности всех звуковых волн, проходящих через расчетную точку, к суммарной интенсивности всех излученных источником шума волн и будет определять уровень снижения шума с учетом прохождения прямого звука через застройку и наличия в ней отраженного шума.

Расчеты показали, что при отражении застройкой $(1 - \beta)100 = 63\%$ энергии ее вклад в звуковое поле возрастает по мере удаления от магистрали. После первого эшелона застройки увеличение уровня шума достигает 1 дБА, после второго – 3 дБА, после третьего – до 5 дБА.

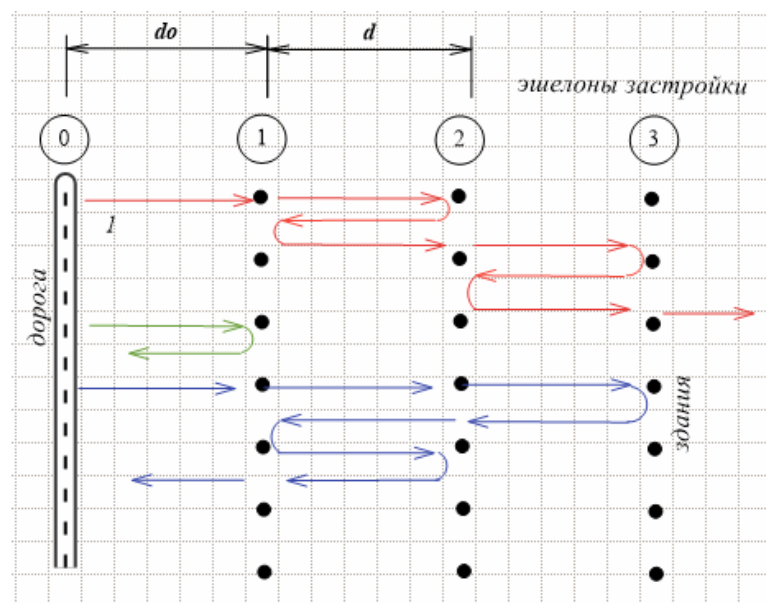


Рис. 4. Траектории движения четырех звуковых волн при вероятностном прохождении или отражении от застройки

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Для проверки точности разработанной методики использованы результаты измерений распространения транспортного шума, выполненных отечественными и датскими специалистами [6].

Измерения шума от скоростной магистрали производились на территории с малоэтажной застройкой (рис. 5, а) на глубину 160 м от центра дороги. Расчетные точки располагались на расстоянии 10 м друг от друга перпендикулярно оси дороги (рис. 5, б).

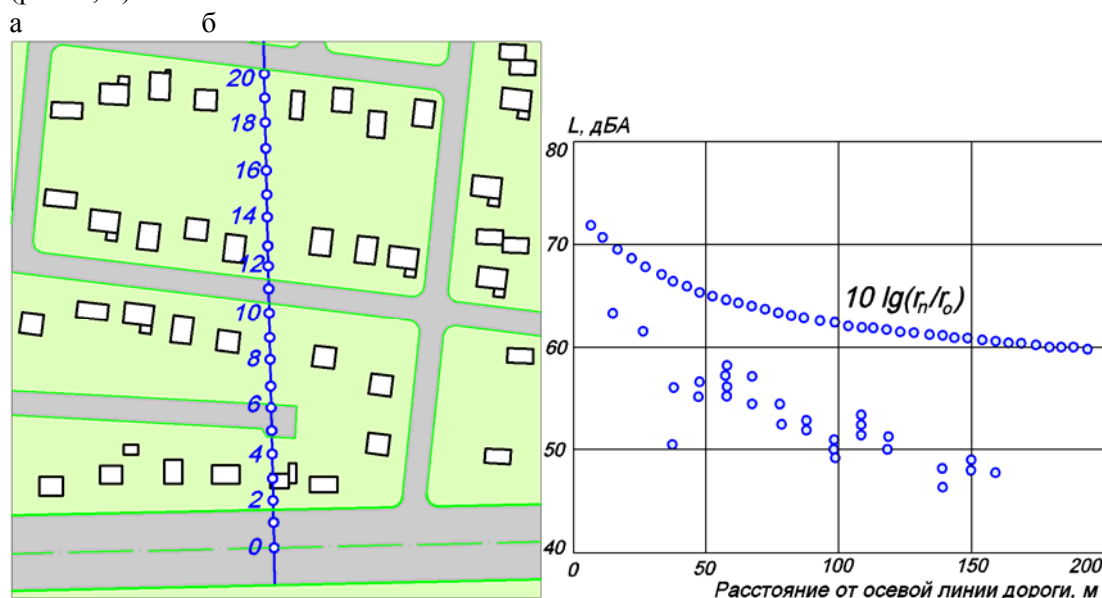


Рис. 5. План участка (а) и измеренные уровни шума (б)

Расчет шума выполнен в октавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц. В СП [2] показано, что распространение шума на этой частоте соответствует распространению шума с коррекцией А. Инженерный расчет транспортного шума по

территории застройки базируется на использовании коэффициента распространения звуковой энергии β , который для данного участка застройки равен:

$$\beta = 0,612 \frac{15}{15+12} - 0,152 \frac{10}{15} = 0,24, \quad (8)$$

где $a = 15$ м – средняя длина просвета между зданиями; $b = 12$ м, $c = 10$ м – средние значения длины и ширины зданий.

Измеренные и рассчитанные уровни шума показаны на графиках рис. 6. Уровень прямого звука (линия 3 на рис. 6) с учетом снижения за счет застройки рассчитан по выражению (3). Влияние подстилающего слоя $\Delta L_{\text{пок}}$ учтено по формуле (10) в [7]. Из результатов расчета (линии 3 и 2) видно, что за счет влияния подстилающего слоя происходит снижение шума до 4 ... 5 дБА на расстоянии более 70 м от дороги. За счет влияния отраженного шума уровни повышаются на 2-3 дБА. Незначительная величина отраженного шума объясняется высокой плотностью застройки, которая пропускает только 24 % падающего звука.

Таким образом, результаты сравнения измеренных и рассчитанных уровней транспортного шума на территории примагистральной застройки показали хорошую сходимость. Расхождения не превышают 3 дБА на удалении от магистрали до 200 м. Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенного метода расчета отраженного звука, образующегося между зданиями малоэтажной примагистральной застройки, в практике борьбы с транспортным шумом.

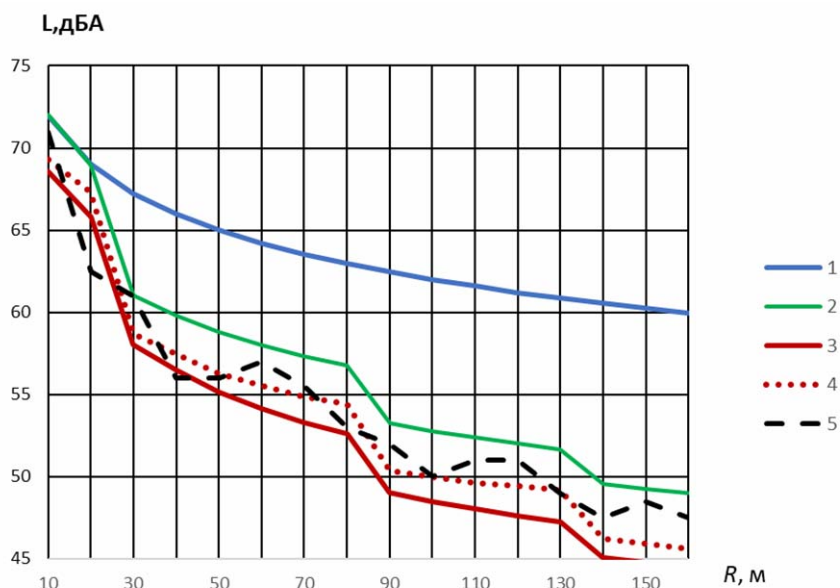


Рис. 6. Уровни шума, измеренные и рассчитанные по инженерной методике:

1 – в свободном поле; 2 – расчет прямого звука по выражению (3) без учета подстилающего слоя; 3 – то же с учетом подстилающего слоя; 4 – расчет с учетом влияния подстилающего слоя и отраженного звука; 5 – измеренные уровни

Выводы

1. Предложена инженерная методика расчета отраженного шума от транспортных магистралей на основе использования коэффициента прохождения звука через малоэтажную застройку.

2. Разработан и программно реализован расчет отраженного шума на основе вероятностного моделирования распространения цилиндрических волн от магистралей как от линейных источников шума.

3. Дан сравнительный анализ расчетных и экспериментальных результатов распространения прямого и отраженного транспортного шума на примагистральной территории с малоэтажной застройкой. Погрешность расчетов не превышает 3 дБ.

4. Разработанный метод обладает высокой точностью, легко алгоритмизируется, позволяет выполнять качественную и количественную оценку шумовой ситуации и на этой основе проектировать эффективные мероприятия шумозащиты.

Список литературы

1. Комплексный подход к защите территорий и жилой застройки от шума транспортных потоков различного вида / В.А. Аистов, Ю.С. Бойко, П.И. Поспелов [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 6(982). – С. 22–23.
2. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. – М.: Минстрой России, 2016.
3. Шубин, И.Л. Расчёт автодорожного шума жилого района Москвы с использованием двух программных средств / И.Л. Шубин, И.Е. Цукерников, Л.А. Тихомиров, А.В. Никифоров // Жилищное строительство. – 2013. – № 6. – С. 2–5.
4. Овсянников, С.Н. Расчёт эквивалентных уровней шумового загрязнения селитебной территории методом обратной трассировки на растре / С.Н. Овсянников, М.С. Овсянников // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 1(2). – С. 50–56.
5. Гречишкин, А.В. Прямой звук от транспортной магистрали на территории малоэтажной застройки / А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, А.А. Путинцева // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2(51).
6. Осипов, Г.Л. Распространение автотранспортного шума в малоэтажной застройке примагистральных территорий / Г.Л. Осипов, В.Е. Коробков, Й. Краг // Исследования по строительной акустике: тр. института НИИСФ Госстроя СССР. – М., 1981. – С. 135–139.
7. ГОСТ 31295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой. – М., 2005.

References

1. An integrated approach to the protection of territories and residential buildings from the noise of traffic flows of various types / V.A. Storov, Yu.S. Boyko, P.I. Pospelov [et al.] // BCE: Bulletin of construction equipment. – 2016. – № 6(982). – P. 22–23.
2. SP 276.1325800.2016. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise. – М.: Gosstroy of Russia, 2016.
3. Shubin, I.L. Calculation of road noise in a residential area of Moscow using two software tools / I.L. Shubin, I.E. Tsukernikov, L.A. Tikhomirov, A.V. Nikiforov // Housing construction. – 2013. – No. 6. – P. 2–5.
4. Ovsyannikov, S. N. Calculation of equivalent levels of noise pollution in a residential area by the method of backtracking on a raster / S.N. Ovsyannikov, M.S. Ovsyannikov // Vestnik TSASU. – 2008. – № 1(2). – P. 50–56.
5. Grechishkin, A.V. Direct sound from the transport highway on the territory of low-rise buildings / A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, A.A. Putintseva // Regional architecture and construction. – 2022. – № 2(51).
6. Osipov, G.L. Propagation of vehicle noise in low-rise buildings of highway territories / G.L. Osipov, V.E. Korobkov, J. Krag // Building Acoustics Research: Proceedings of the Research Institute of Building Physics, Gosstroy of the USSR. – М., 1981. – P. 135–139.
7. GOST 31295.1-2005 (ISO 9613-1:1993). Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1. Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. – М., 2005.

УДК 72.6.5

DOI 10.54734/20722958_2023_3_202

Российский государственный
педагогический университет
им. А.И. Герцена

Россия, 191186, Санкт-Петербург,
наб. реки Мойки, 48,
тел: 8 (812) 314-49-84

Гильдина Татьяна Александровна,
кандидат искусствоведения, доцент
кафедры «Искусствоведение и педагогика
искусства» института художественного
образования
E-mail: felmantanya@gmail.com

Russian State Pedagogical University
A. I. Herzen

Russia, 191186, St. Petersburg, 48,
embankment of the river Moika,
tel: 8 (911) 134-48-71

Gildina Tatyana Aleksandrovna,
Candidate of Art History, Docent of the
department of Art History and Pedagogy of Art
E-mail: felmantanya@gmail.com

АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВЕЙ ГЛАЗОВСКОГО УЕЗДА ВЯТСКОЙ ГУБЕРНИИ КОНЦА XVIII – НАЧАЛА XX ВЕКА

Т.А. Гильдина

Презентованы итоги комплексного исследования храмовой архитектуры станов и населённых мест Глазовского уезда Вятской губернии. Представлены уникальные памятники, обследованные в ходе экспедиции 2022 года по территориям сельских районов Кировской области и Удмуртской Республики, которые в период конца XVIII – начала XX века располагались в границах Глазовского уезда Вятской губернии. Предложена типология объемно-пространственных решений храмов и определены количественные и качественные изменения композиционных структур в регионе.

Ключевые слова: архитектурное наследие Вятской губернии; Глазовский уезд; храмовая архитектура; композиция; картограмма

ARCHITECTURE OF CHURCHES OF THE GLAZOV DISTRICT OF THE VYATKA PROVINCE IN THE END OF THE 18TH – BEGINNING OF THE 20TH CENTURY

T.A. Gildina

The results of a comprehensive study of the temple architecture of the camps and settlements of the Glazovsky district of the Vyatka province are given. Unique monuments examined during the 2022 expedition through the territories of rural areas of the Kirov region and the Udmurt Republic are presented. In the period of the late 18th – early 20th centuries they were located within the borders of the Glazov district of the Vyatka province. A typology of volume-spatial solutions of temples is offered and quantitative changes of composite structures in the region are determined.

Keywords: architectural heritage of the Vyatka province; Glazovsky district; temple architecture; composition; cartogram

Архитектурное наследие провинции – это значительная часть культурного наследия страны, и в нынешних реалиях сохранение, восстановление и популяризация архитектурного наследия регионов является одной из важнейших задач, стоящих перед государством.

Согласно п.10 № 73-ФЗ полномочия в области сохранения, использования, популяризации и государственной охраны объектов культурного наследия находятся в ведении органов государственной власти субъектов Федерации, за исключением отдельных объектов культурного наследия [1]; тем не менее можно отметить кардинально разное отношение субъектов к охранному статусу сооружений. Сегодня все больше исследователей и специалистов в области реконструкции обращаются к анализу проблем в сфере законодательства. Например, Ю.Ю. Курашов и Ю.М. Бердюгина

отмечают спорность Федерального закона № 73-ФЗ, который не способствует бережному отношению к архитектурному наследию без осмысления экономических, культурных и социальных особенностей конкретного региона [2, с.129].

Учитывая плачевное состояние множества уникальных памятников архитектуры, особенно актуальным становится восстановление научного базиса, что будет стимулировать интерес к истории культуры провинции. Натурные и полевые исследования позволяют собрать актуальные сведения и данные о состоянии памятника и являются первостепенным шагом комплексного исследования.

В период с 06.07.2022 по 09.07.2022 автором в составе исследовательского коллектива (М. В. Курочкин, доцент кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО УдГУ; Т. А. Гильдина, доцент кафедры искусствovedения и педагогики искусства ФГБОУ ВО РГПУ им. А. И. Герцена; Д. Н. Ральников, архитектор) была организована экспедиция по сельским районам Удмуртской Республики и Кировской области, которые в период конца XVIII – начала XX века располагались в границах Глазовского уезда Вятской губернии. В программу организации полевого исследования входил ряд задач: 1) разработка и детализация маршрутов; 2) подготовка и организация экспедиции; 3) обследование архитектурных сооружений на местности; 4) фото-, видео- и графическая фиксация, а также проведение обмеров некоторых сооружений; 5) камеральная обработка собранных материалов.

Маршрут пролегал через следующие населенные пункты: Удмуртская Республика: сёла Красногорское, Курья, Большой Селег, Елово; Кировская область: сёла: Уть, Сардык, поселок Уни, сёла Сосновка, Порез, Рябово, Лема, город Зуевка, село Фалёнки. Общий километраж экспедиции по обозначенным территориям составил более 770 км.

В результате камеральной обработки собранных в ходе экспедиции данных, а также материалов предыдущих исследований были установлены типы объёмно-пространственных решений и варианты реализации композиционных приёмов памятников церковного зодчества (табл. 1). Применение графоаналитического метода и последующая разработка *хроно-типологической картограммы* (табл. 2) позволили определить архитектурно-художественное своеобразие и проанализировать количественные и качественные изменения композиционных структур.

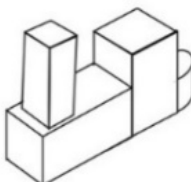
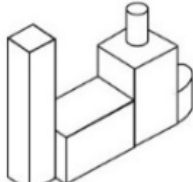
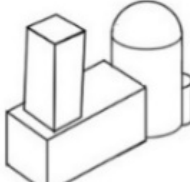
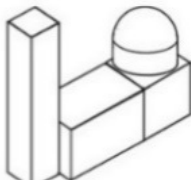
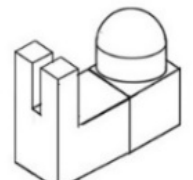
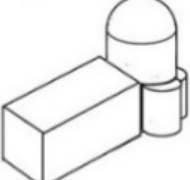
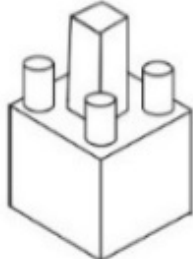
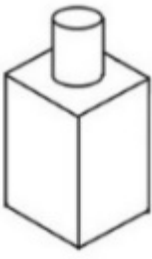
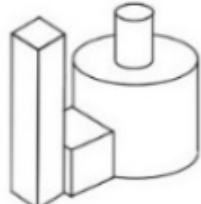
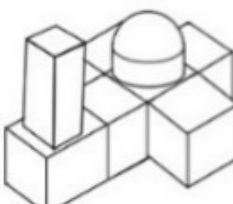
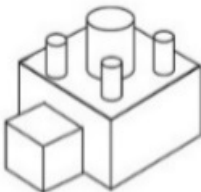
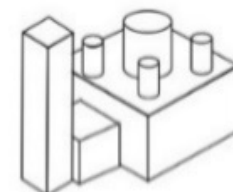
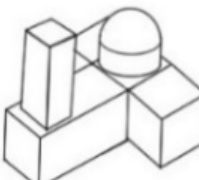
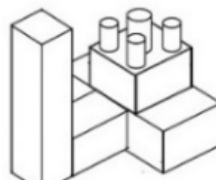
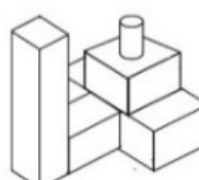
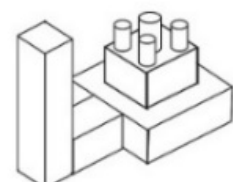
Картографической основой выступила карта Вятской губернии 1871 года картографического заведения А. Ильина (масштаб 30 верст в 1 дюйме) [3, с.15] с отмеченными на ней сооружениями, обозначенными знаками разных форм и цветов, которые соответствуют типам и периодам постройки. Исторические карты могут носить приблизительный характер, поэтому для более точной привязки объектов к картографической основе был использован сервис «ЭтоМесто» (<http://www.etomesto.ru/>), который, опираясь на спутниковые геоданные, позволяет с высокой точностью сопоставить исторические и современные карты.

Разработку картограммы предварял типологический анализ объёмно-пространственных решений. В ходе работы на исследуемой территории было выявлено шесть типов решения храмов: «храм кораблём», ярусный, тип с продольно-осевой композицией с центрическим храмом, соборный, тип с продольно-осевой композицией с крещатой основой, тип с продольно-осевой композицией с основой, вписанной в квадрат.

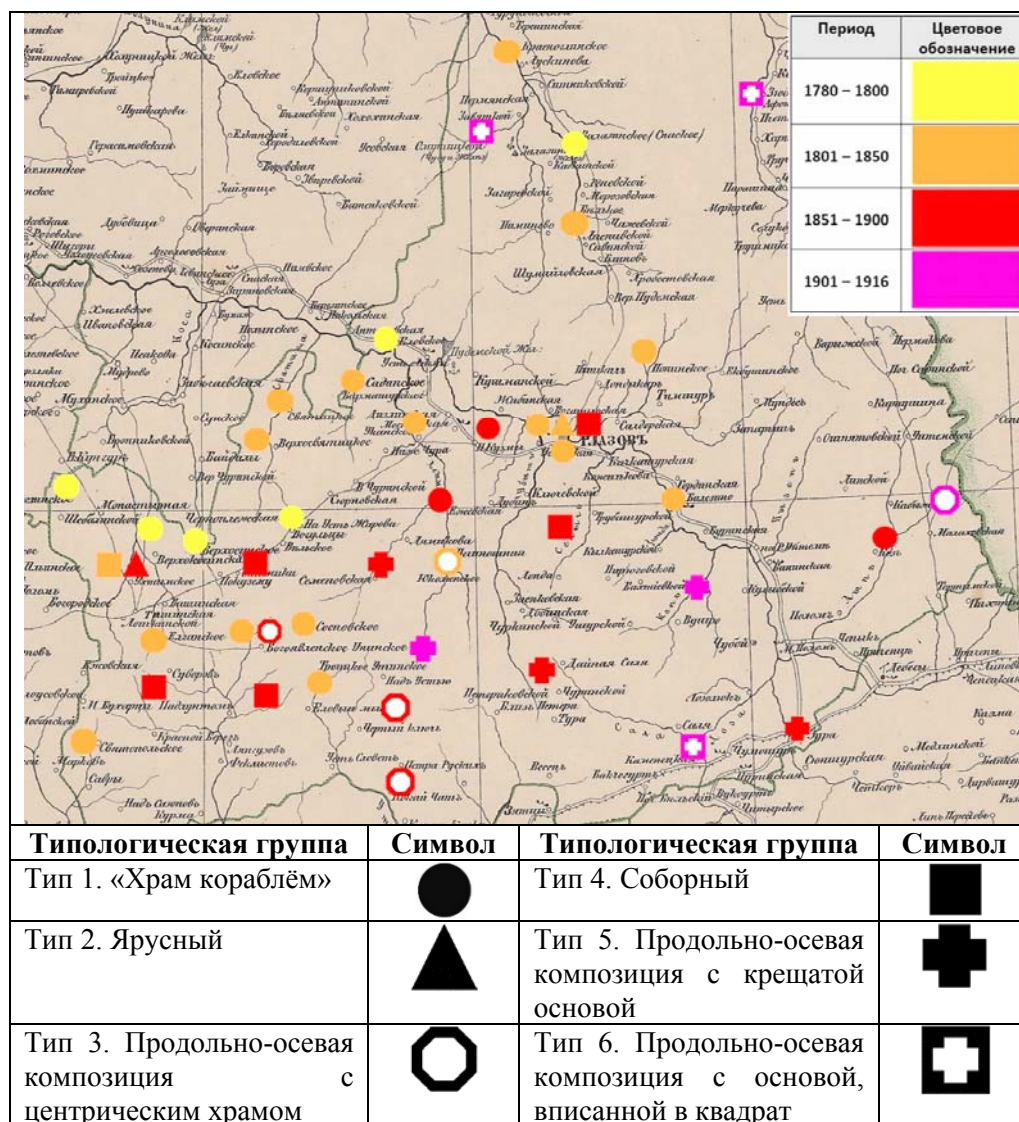
Предложенная типология объёмно-пространственных решений храмовой архитектуры основывается на предыдущих изысканиях автора и таких специалистов в области региональной архитектуры, как Е.Л. Скопин [4], М.В. Курочкин [5] и А.Н. Федоров [6].

По итогам исследования можно отметить, что храмы типа «храм кораблём» наиболее распространены в регионе (более 50 % от общего количества). Данный тип представлен большим количеством вариаций объёмно-пространственного решения. Можно сказать, что появление в регионе каменно-кирпичной храмовой архитектуры в конце XVIII века ознаменовано обозначенным типом.

Варианты объемно-пространственных решений (вып. автор, 2023)

Тип 1. «Храм кораблём»		
		
		
Тип 2. Ярусный		
		
Тип 3. Продольно-осевая композиция с центрическим храмом		
		
Тип 4. Соборный		
		
Тип 5. Продольно-осевая композиция с крещатой основой		
		
Тип 6. Продольно-осевая композиция с основой, вписанной в квадрат		
		

Картограмма распределения объемно-пространственных решений (вып. автор, 2023)



Выдающимся примером выделенного типологического решения можно считать церковь Богоявления Господня в селе Лема (1780–1794 гг., 1849 г. – трапезная, 1895 г. – расширение). Облик храма формировался на протяжении долгого времени и включает элементы разных периодов (рис. 1).

Основной объём выстроен в виде двусветного массивного четверика, завершённого сомкнутой кровлей с двумя малыми восьмериками под луковичной главкой. С западной стороны с 1849 г. постепенно возводились просторная трапезная и ярусная колокольня с двухэтажными пристройками с северной и южной сторон от притвора. Основной объём и декоративное оформление выполнено в традициях регионального стиля – вятского барокко. Фигурная кладка и резьба по кирпичу демонстрируют эстетические свойства этого традиционного строительного материала и высокое мастерство камнетёсов. Архитектурный декор колокольни и поздних пристроек сдержан и отражают классицистическую специфику.

Церковь была закрыта в 1930 г. и затем использовалась под склад и машинно-тракторную мастерскую. Храм не обладает статусом объекта культурного наследия регионального или местного значения, что усугубляет ситуацию – одна из самых старейших церквей региона сегодня нуждается во внимании властей, так как значительные части сооружения уничтожены. Силуэтное решение Богоявленской церкви было распространено в каменно-кирпичных храмах региона начиная с середины и до конца

XVIII в. Пять из шести сооружений, построенных в последние десятилетия XVIII в., созданы в упомянутом композиционном решении.

Например, церковь Троицы Живоначальной в селе Елово (1795 г., арх. Ф.М. Росляков) (рис. 2). При традиционном композиционном решении церковь отличается весьма скромный архитектурный декор, что ставит памятник в ряд примеров, иллюстрирующих переход к классицистической традиции.



Рис. 1. Церковь Богоявления Господня
в с. Лема Кировской области.
Фото автора, 2022 г.



Рис. 2. Церковь Троицы Живоначальной в с. Елово
Удмуртской Республики.
Фото автора, 2022 г.

Церковь была закрыта в 1940 г., здание передано под культурное учреждение. Современное состояние можно оценить как неудовлетворительное несмотря на то, что здание церкви является объектом культурного наследия регионального значения (Постановление СМ РСФСР от 30.08.60 г. № 1327) [7]. Местами отсутствуют кровля, некоторые части конструкции и элементы, на крыше присутствует поросль.

В начале XIX века получает большое распространение вариант упомянутого типа, при котором основной объём завершается барабаном и полусферическим или гранёным куполом. В ста километрах от города Глазова, в прошлом уездного центра Глазовского уезда, находилось село Уть, в котором была возведена церковь Вознесения Господня (1818–1845 гг., арх. Ф. М. Росляков (основной объём)). Четверик основного объёма увенчан восьмериком под гранённым куполом с люкарнами и двумя малыми восьмериками с луковичной главкой. Полукруглая небольшая апсида примыкает с востока, с запада – широкая трапезная и притвор с двухъярусной колокольной под шпилем. Западная часть отмечена четырёхколонным портиком, к которому был пристроен пониженный портик с двумя четырёхгранными столбами. Архитектурный декор сдержан и ограничивается профилированным карнизом и чередованием прямоугольных неглубоких ниш. Решение основной части храма отсылает к другим известным постройкам Ф.М. Рослякова: это церковь Вознесения Господня в селе Узи Малмыжского уезда и церковь Покрова Пресвятой Богородицы в селе Новый Мултан Малмыжского уезда (существующие в настоящее время сёла Удмуртской Республики).

Анализируя данные картограммы, можно отметить, что в первая половина XIX века характеризуется пиком строительной активности и более 77 % от общего числа возведенных храмов в этот период имеют тип «храм кораблём». Постепенно начиная со второй половины XIX века увеличивается разнообразие объемно-пространственных решений храмов. Одним из вариантов, который получает распространение, стал *соборный тип*, внешне отличающийся масштабностью, с компактным объёмом основной части храма, увенчанный пятью главами (или шатрами).

Примером можно считать церковь Александра Невского в селе Сардык (1896 г.) (рис. 3). Церковь представляла собой массивный двусветный четверик, завершённый пятью широко расставленными луковичными главами на шестигранных барабанах. С восточной стороны прямоугольная апсида, а с западной такой же притвор. Похожее решение имела церковь Благовещения Пресвятой Богородицы в селе Верхобелье (1883 г.). Указанные примеры имеют явную связь с проектом К.А. Тона, опубликованным в альбоме его проектов [8, с.52].



Рис. 3. Церковь Александра Невского в с. Сардык Кировской области. Фото автора, 2022 г.

Во второй половине XIX века получает распространение *тип продольно-осевой композиции с центрическим храмом*. В качестве примера можно привести церковь Покрова Пресвятой Богородицы в селе Большой Селег (1881–1895 гг., арх. В.М. Дружинин) (рис. 4). Главной композиционной особенностью является решение основной части храма в виде массивного восьмерика, увенчанного гранёным барабаном с шатром с маленькой главкой. С восточной стороны пристроена небольшая пятигранная апсида, а с запада – узкая трапезная, которая связывает основной объём с трёхъярусной шатровой колокольной. Архитектурный декор подчинён традициям эклектики.



Рис. 4. Церковь Покрова Пресвятой Богородицы в с. Большой Селег Удмуртской Республики. Фото автора, 2022 г.

В 1940 г. здание было передано под школу и позже заброшено. В настоящее время сохранилась лишь часть основного объёма и апсида. В 2018 г. силами волонтеров во главе с архитектором, членом правления УРООО Союза архитекторов России Н.Е. Степанюк были проведены работы по очистке кровли от поросли и очистке территории храма от мусора [9].

Композиция с октогональной основой не распространена в регионе; на сегодняшний день сохранилась вторая церковь, выполненная по этому проекту В.М. Дружининым, – церковь Троицы Живоначальной в селе Валамаз (в настоящее время Удмуртская Республика), по которой можно судить об облике разрушающегося сооружения.

Весьма популярным в регионе становится *тип продольно-осевой композиции с крещатой основой*, характерным примером которого стала церковь Покрова Пресвятой Богородицы в селе Святогорье (Красногорское) (1890–1900 гг., арх. В.М. Дружинин (основной объём и малые главки), И.А. Чарушин (колокольня и барабан)). Композиция церкви повторяет решение церкви в селе Большая Пурга Сарапульского уезда (1890–1899 гг.).

Кирпичная церковь представляет собой крестообразный четырёхстолпный объём с цилиндрическими башенками по внутренним углам основного объёма, увенчанными главками. Завершается церковь многогранным световым барабаном с куполом. С запада над притвором пристроена двухъярусная колокольня с шатровым завершением. Северные и южные стороны основного объёма выделены небольшими ризалитами.

В настоящее время церковь имеет хорошую сохранность, а также обладает охранным статусом объекта культурного наследия регионального значения (Пост. СМ УАССР от 05.04.93 г. № 136) [7].

Упомянутый тип получает развитие и в начале XX в. в варианте решения церкви Николая Чудотворца в селе Курья (1908–1914 гг., арх. И. А. Чарушин). Композиция церкви состояла из основного двусветного объёма в форме четверика с одной главой, небольшой апсиды с востока, с северной и южной сторон – развитых приделов, трапезной с западной стороны, соединяющей основной объём и трёхъярусную шатровую колокольню. По этому проекту была построена церковь в селе Перевозное Сарапульского уезда (1903–1908 гг., арх. И.А. Чарушин). Упомянутое решение в значительной мере опирается на проект 1900 года церкви для гор. Старое Село Витебской губернии архитектора и гражданского инженера В.Ф. Коршикова, опубликованного в журнале «Строитель», № 2 за 1900 год [10, С. 144].

В разное время здание церкви занимали школа, спортзал и пожарная станция. Несмотря на хорошую сохранность частей здания, внешний облик церкви сильно искажен – нет части основного объёма, венчания и колокольни, а также сделаны критические перестройки.

Ситуация с культурным наследием является частью комплексной проблемы состояния сельских районов: это отсутствие хороших транспортных путей и постепенное запустение сёл и деревень, а также туристическая непопулярность региона. Исследуемые архитектурные сооружения не являются объектами обширного научного интереса, и новые исследования позволят привлечь внимание широкого круга к угасающему наследию регионов.

Результаты экспедиции: 1) разработан и реализован маршрут экспедиции; 2) собран достаточный для систематизации и публикаций объём натурного материала, который позволил дать исчерпывающее представление об объёмно-пространственных характеристиках и состоянии памятника на момент проведения исследования; 3) в ходе натурного обследования памятников и по итогам камеральной обработки собранного материала удалось уточнить ряд сведений по отдельным архитектурным сооружениям; 4) проведены обмеры ряда сооружений с целью установления особенностей планировочной структуры и будущей отрисовки планов и схем. В перспективе необходима разработка новых маршрутов и проведение экспедиций по территориям обозначенного региона с целью сбора данных по другим сооружениям, а также для проведения подробных обмеров.

В результате анализа данных, полученных при разработке картограммы, стало возможным определить тенденции распространения типов объемно-пространственных решений храмов и топографию строительства и сделать следующие выводы:

- храмостроение распространялось по направлению от юго-западной части к северо-восточной части Глазовского уезда с постепенным уменьшением интенсивности строительства;
- большая часть сооружений, а также самые ранние памятники были возведены на территориях, близких к границе Глазовского и Вятского уездов, что обуславливалось близостью к губернскому центру;
- каменно-кирпичное храмовое строительство в юго-восточной части уезда активизируется лишь со второй половины XIX века;
- количественный показатель свидетельствует о том, что пик строительной активности пришелся на вторую четверть XIX века, но многообразие типов характерно лишь для второй половины XIX века.

Исследование, организованное в нескольких направлениях, конкретизирует художественные особенности архитектуры региона с точки зрения архитектуроведения, и в результате формируется целостная картина архитектурного своеобразия русской провинции как значимой части историко-культурного наследия России.

Список литературы

1. Федеральный закон от 25.06.2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» // Российская газета. – 2002. – № 116–117. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/ (дата обращения: 02.04.2023).
2. Курашов, Ю.Ю. К вопросу о разработке критериев статуса объекта культурного наследия / Ю.Ю. Курашов, Ю.М. Бердюгина // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2016 году: сборник научных трудов РААСН. – М.: АСВ, 2017. – С. 129–137.
3. Карта Вятской губернии // Подробный атлас Российской империи с планами главных городов: 70 карт. – СПб.: Картографическое заведение А. Ильина, 1871. – С. 15.
4. Скопин, Е.Л. Собор Михаила Архангела в Ижевске. История строительства и восстановления / Е.Л. Скопин. – Киров, 2013. – 280 с.
5. Гильдина, Т.А. Типологическое разнообразие храмовой архитектуры в творчестве Филимона Меркурьевича Рослякова / Т.А. Гильдина, М.В. Курочкин // Иднa-кар: методы историко-культурной реконструкции. – 2017. – № 1 (34). – С. 217–225.
6. Федоров, А.Н. Основные тенденции формирования архитектурно-художественной системы традиционного христианского храма: дис. ... д. иск.: спец. 17.00.04 / А.Н. Федоров; РГПУ им. А. И. Герцена. – СПб., 2022. – 498 с.
7. Объекты культурного наследия (памятники истории и культуры) регионального (Удмуртской Республики) значения // Официальный сайт главы Удмуртской Республики и Правительства Удмуртской Республики. – Ижевск, 2019. – URL: <http://www.udmurt.ru/region/social/culture/Files/NedvPamIst/UR.php> (дата обращения: 14.04.2023).
8. Тон, К.А. Церкви, сочиненные архитектором Его Императорского Величества профессором архитектуры Императорской Академии художеств и членом разных иностранных академий Константином Тоном / К.А. Тон. – СПб., 1838. – 70 с.
9. Степанюк, Н.Е. Архитектурное волонтерство: Большой Селег. Церковь Покрова Пресвятой Богородицы / Н.Е. Степанюк. – Ижевск, 2018. – URL: <http://tehne.com/event/nashi-proekty/arhitekturnoe-volontyorstvo-bolshoy-seleg-cerkov-pokrova-presvyatoy-bogorodicy> (дата обращения: 02.05.2023).
10. Строитель: вестник архитектуры, домовладения и санитарного зодчества. – СПб., 1900. – № 1–2. – 80 с.

1. Federal Law of June 25, 2002 No. 73-F3 "On objects of cultural heritage (monuments of history and culture) of the peoples of the Russian Federation" // Rossiyskaya Gazeta. – 2002. – No. 116-117. – URL: [http://www.consultant.ru / document / cons_doc_LAW_37318/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/) (date of access: 02.04.2023).
2. Kurashov, Yu.Yu. On the issue of developing criteria for the status of a cultural heritage object / Yu. Yu. Kurashov, Yu. M. Berdyugina // Fundamental, search and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2016: Collection of scientific papers of the RAASN. – M.: DIA Publishing House, 2017. – P. 129–137.
3. Map of the Vyatka province // Detailed atlas of the Russian Empire with plans for the main cities: 70 maps. – St. Petersburg: Cartographic institution A. Ilyin, 1871. – P. 15.
4. Skopin, E.L. Cathedral of Michael the Archangel in Izhevsk. History of construction and restoration / E.L. Skopin. – Kirov, 2013. – 280 p.
5. Gildina, T.A. Typological diversity of temple architecture in the work of Filimon Merkurievich Roslyakov / T.A. Gildina, M.V. Kurochkin // Idnakar: methods of historical and cultural reconstruction. – 2017. – No. 1 (34). – P. 217–225.
6. Fedorov, A.N. The main trends in the formation of the architectural and artistic system of the traditional Christian church: The dissertation on competition of a scientific degree doctor of art criticism: special 17.00.04 / A.N. Fedorov; Russian State Pedagogical University A. I. Herzen. – St. Petersburg, 2022. – 498 p.
7. Objects of cultural heritage (monuments of history and culture) of regional (Udmurt Republic) significance // Official website of the head of the Udmurt Republic and the government of the Udmurt Republic. – Izhevsk, 2019. – URL: <http://www.udmurt.ru/region/social/culture/Files/NedvPamIst/UR.php> (date of access: 14.04.2023).
8. Ton, K.A. Churches, composed by the architect of His Imperial Majesty, professor of architecture at the Imperial Academy of Arts and a member of various foreign academies Konstantin Ton / K.A. Ton. – St. Petersburg, 1838. – 70 p.
9. Stepanjuk, N.E. Architectural volunteering: Big Seleg. Church of the Intercession of the Holy Mother of God / N.E. Stepanjuk. – Izhevsk, 2018. – URL: <http://tehne.com/event/nashi-proekty/arhitektturnoe-volontyorstvo-bolshoy-seleg-cerkov-pokrova-presvyatoy-bogorodicy> (date of access: 02.05.2023).
10. Stroitel' : a messenger of architecture, homeownership and sanitary architecture. – St. Petersburg, 1900. – № 1–2. – 80 p.

УДК 72:727:711.523-042.2

DOI 10.54734/20722958_2023_3_211

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Мирхасанов Рустем Фаритович,
старший преподаватель кафедры
«Конструктивно-дизайнерское
проектирование»

E-mail: rystem69@mail.ru

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Конструктивно-дизайнерское
проектирование»

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Пензенский казачий институт технологий
(филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский
государственный университет технологий
и управления имени К.Г. Разумовского
(Первый казачий университет)

Россия, г. Пенза, ул. Володарского, д.6

Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Защита в чрезвычайных ситуациях»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, st. Kremlin, d. 18

Mirkhasanov Rustem Faritovich,
Senior Lecturer of the Department «Structural
engineering and design»

E-mail: rystem69@mail.ru

Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Structural engineering and
design»

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Penza Cossack Institute of Technology
(branch) of the Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Technology and
Management named after K.G. Razumovsky
(First Cossack University)

Russia, Penza, 6, Volodarsky St.

Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Protection in emergency
situations»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ ЭСТЕТИКА В ПОСТРОЙКАХ ПЭНА С.С.

Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Проанализировано влияние инженерной мысли на развитие композиционной формы архитектуры начала XX века (на примере дома печати в Казани, клуба в Москве, дворца печати в Баку); отмечена важность вычленения обучающимися и специалистами аналогии, близости и родственных связей в искусственно созданных ранее художественно-конструкторских формах на примере творчества инженера и архитектора С.С. Пэна.

Ключевые слова: архитектура, композиционная форма, инженерная мысль, творческий продукт, дизайн

ENGINEERING AND CONSTRUCTION AESTHETICS OF PEN S.S.

R.F. Mirsakhonov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin

The influence of engineering thought on the development of compositional form in the architecture of the early 20th century is analyzed (the printing house in Kazan, the club in Moscow, the printing palace in Baku); the importance of isolation by students and specialists of analogy, proximity and family ties in previously created artificially artistic and design forms on the example of the work of engineer and architect S.S. Pan is stated.

Keywords: architecture, compositional form, engineering, creative product, design

Цемент и бетон были визитными карточками эпохи модернизма, «костью цивилизации» XX века; важно было знать особенности и способы удешевления этих строительных материалов. В 1956 г. в серии «Строительная техника в Англии» вышла всемирно известная книга «Асбестоцемент в промышленном строительстве Англии»

теоретика и практика архитектуры, инженера и ученого Пэна Семена Самойловича (1897—1970 гг.).

В 1925 г. С.С. Пэн окончил ведущий архитектурно-строительный вуз СССР – Ленинградский институт гражданских инженеров; специализировался в области проектирования зданий для полиграфических производств, являлся лауреатом Сталинской премии (1950 г.), одним из разработчиков идеи «машина – жилье» Корбюзье. Работая в ЦНИИ промышленных сооружений и будучи автором более 50 изобретений, занимался внедрением схемы «дом – машина» для полиграфического производства, которое считается одним из самых вредных для здоровья рабочих. Издательское дело в императорской России отличалось максимальной концентрацией его в обеих столицах, и хотя на долю провинции приходилась малая толика тиражей, Казанская губерния выделялась и количеством издательств, и объемом печатной продукции. Об этом говорит и существующая статистика, и литература. Не вызывает удивления такой факт, что в первые годы существования Советской России резко возросла потребность в агитационно-пропагандистских и научных публикациях.

Интересно фиксировать единые для творчества инженера-строителя Пэна С.С. элементы, которые прослеживаются на протяжении его творческого пути в разных объектах. Для всех трех проектов Пэна С.С., связанных с полиграфией, характерны образы машин: объекты транслируют образы паровозов (клуб «Рот фронт» в Москве) и океанские лайнеры. Крестообразная композиция фасадов объектов возникает в результате столкновения вертикального и протяженного горизонтального объема. Для творчества С.С. Пэна характерны полукруглые в плане объемы, круглые, напоминающие иллюминаторы окна, отдельные вертикальные «строки» полос остекления, четко выраженные ярусы горизонталей окон от пола до потолочного перекрытия.

Клуб в Москве. Первый в СССР клуб работников полиграфии – это типография «Красный пролетарий», или клуб «Рот фронт» (рис. 1) – проект Семена Пэна в русле конструктивизма. Объект расположен в Москве по Краснопролетарской улице, дом 32/34. Здание клуба-типографии получило название Rote Front в честь Союза немецких фронтовиков-коммунистов. Объемно-пространственная композиция здания представляет собой центральную часть со зрительным залом на 500 человек, вокруг которого расположены остальные помещения. Фасад имеет простую форму, лишённую декора, обогащенную горизонтальной лентой остекления. Украшением фасада здания является окружность окна, консольный козырек входа, разнохарактерность объёмов цилиндрических и прямоугольных объёмов, что вкуче придаёт зданию сходство с образом паровоза или океанского лайнера. На крыше здания находится открытая терраса с летним буфетом, ограждения которой напоминают образ перил корабля. Проект предусматривал декор стен помещения клуба фресковой живописью по эскизам членов Ассоциации монументалистов, но клуб открылся без вентиляции, без росписи и наполнения интерьеров предметами. Архитектурная эстетика фасадов здания определяется его внутренней жизнью: логистикой перемещений посетителей и работников клуба. Внутренняя жизнь здания согласно идеям приверженцев конструктивизма и функционализма «выплескивается» на фасады объекта инженерно-архитектурной мысли. Этот объект интересен историческим периодом, временем, требовавшим новых архитектурных форм для социальных проектов типа столовых, клубов, «изб-читален» для рабочих, так и тем, что строил объект инженер. Как инженер, Пэн игнорировал исторические реминисценции, его не интересовали ордерная система, архитектурные детали. Пэн создавал новое искусство, которое игнорировало предшествующий архитектурный опыт. Его интересовала конструкция, объем, площадь, пропорции стен, окон. Таким образом, постройка Пэна отличалась мощным преобладанием композиционного (конструктивного) начала над эстетикой, которая была отнесена к классово чуждой социально-архитектурной области. Здание ломало все представления о прекрасном, относя ремесленного характера архитектуру как вид «изящных искусств» к прошедшему времени.



Рис. 1. Типография «Красный пролетарий», или клуб «Рот фронт», г.Москва

Дворец печати в Баку. Город Баку благодаря расположению в теплой климатической зоне знаменит объектами с характерными для конструктивизма открытыми террасами, сплошным остеклением, садами на крышах. Дефицитный металл и цемент, характеризующие конструктивизм, были заменены на местный апшеронский камень, который штукатурился «под бетон». Здесь творили такие «глыбы», как братья Веснины, Моисей Гинзбург, Лев Ильин, Соломон Иоффе. Молодой инженер Семён Пэн в Азербайджане начал свой путь профессиональной деятельности в русле специализации на постройках для полиграфического производства.

В 1927 году был объявлен конкурс на лучший проект нового Дворца Печати «Азернешр». В это время Семену Пэну было всего 30 лет, и его проект победил более чем сорок проектов знаменитых архитекторов. Концепция, композиционная идея здания «Азернешр» заметна уже в московском клубе-типографии «Рот фронт». Строительство началось в 1928 г., а к 1930 г. здание внешне уже было построено. В следующем году производилась внутренняя отделка. Проект «Азернешр» прогремел на всю страну как яркий пример авангардизма в СССР еще до окончания строительства. Для страны, которая завершила гражданскую войну и поднималась после разрухи, проект был очень актуален. Здание «Азернешр» в Баку – это образ морского круизного лайнера с трубами (башня лифта) и палубами для прогулок, подводной лодки, поднявшей свой перископ. Здание «Азернешр» напоминало и образ самолета с расправленными крыльями. Бакинский проект был у всех на устах, о нем писали в прессе, делилась впечатлениями художественная общественность (рис. 2).



Рис. 2. Здание «Азернешр», г.Баку

Но политика в стране в отношении конструктивизма резко поменялась; начал прослеживаться интерес к неоклассицизму, к огромным масштабным постройкам, транслирующим мощь страны, а не трагизм послереволюционного строительства. А в 1934 г. Центральным комитетом Компартии Азербайджана был издан указ, раскритиковавший конструктивизм; зазвучал призыв к возврату к архитектурной эстетике, к национальным традициям и корням, а дворец печати «Азернешр» транслировал своими фасадами идеи интернационального искусства. Объект прекрасно вписан в начало проспекта Азербайджана и формирует эстетику всего квартала.

Казанский Дом печати. Следующим важным проектом инженера Пэна был проект казанского Дома печати (рис. 3). Здание Дома печати – один из ярких образцов конструктивизма в Казани. Протяженный по горизонтали параллелепипед редакционно-издательского корпуса располагается на довольно узкой по ширине улице Баумана. На нижнем этаже комплекса по производству и трансляции печатной информационной продукции располагались магазины «Татиздата». Образным решением редакционного корпуса стала раскрытая книга с окнами – строчками текста и закругленным в плане корешком книги. Его ведущий архитектурный мотив – три яруса здания на колоннах нижнего яруса – очень логично использован; он визуально расширяет улицу, параллельную главному фасаду. Расширяет визуально пространство и огромная площадь остекления фасада здания: прохожие видят отражение зданий и улицы в окнах. Благодаря колоннам нижнего яруса создается ощущение легкости и нивелируется монотонная аскетичность фасада. Подобное композиционное решение применил С.С. Пэн и в бакинском Дворце печати «Азернешр».



Рис. 3. Здание Дома печати, г.Казань

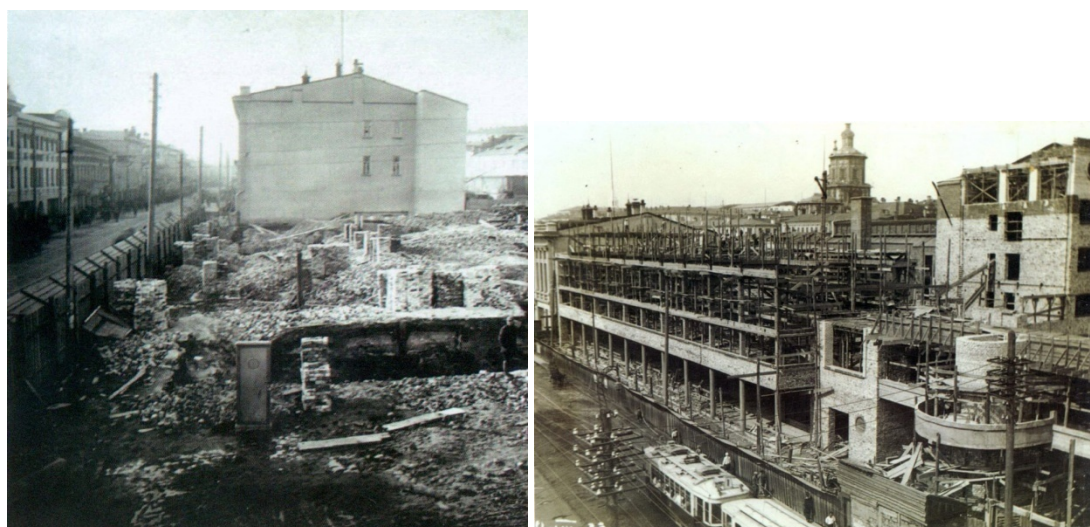


Рис. 4. Строительство Дома печати, г.Казань (август 1933 г.)

Реставрация здания в ХХI в. выявила, что перекрытия выше первого этажа были деревянными, а стены были сложены из разного кирпича (в 30-х г. ХХ в. страна испытывала проблемы со стройматериалами); под слоем штукатурки реставраторы обнаружили красный и силикатный кирпичи и даже деревянный брус.

Эстетика бетона как материала была заложена в проектах инженером Пэнном. И не его вина, что этот материал был дорогим и редким в молодой советской России. Замена бетона в постройках бакинского «Азернешра» и казанского Дома печати на местный природный камень (Баку) и кирпичи (Казань) не является задумкой инженера, а лишь отражает ситуацию несоответствия идеи и материально-технических возможностей молодой советской страны.

Сторонники «функционального и конструктивного преобразования окружающей среды» Западной Европы, Советской России – СССР, сторонники новых форм в зодчестве мысленно «сняли» с фасадов классического вида изобразительного искусства (архитектуры) «одежды» исторических эпох, получив чистые геометрические формы для современного пластического искусства. Пэн был представителем новой эпохи и инженером и, судя по его творческим продуктам, не испытывал ностальгии по архитектурной эстетике прошлых эпох. Даже сегодня, спустя 100 лет, есть много представителей творческой интеллигенции, дизайнеров, студентов, которые сожалеют о нивелировании в современной архитектуре декоративных элементов прошлых исторических эпох. Тем более ценна позиция, энергия, понимание правильности композиционного мышления инженера Пэна, который прокладывал новые пути в формообразовании. Благодаря таким личностям, как Пэн, с «незашоренным» видением строительства зданий промышленного назначения, была сломана традиция «украшательства», декорирования зданий эклектичными элементами прошлых эпох.

Инженерная эстетика фасадов трех указанных построек отражает решительный отход от многовековой ремесленной архитектуры как вида «изящных искусств» в сторону поиска новых форм. Промышленно-инженерная эстетика преобладает в данных постройках над архитектурной эстетикой. Брутальная мощь здания, колонны нижнего яруса, вертикаль объема лестничных клеток делают эти проекты раннего модернизма важными не только для российской/советской, но и для мировой архитектуры. Нет сомнений, что именно инженерная, машинная эстетика стала образом и композиционным стержнем в проектах клуба-типографии в Москве, Дворца печати «Азернешр» в Баку и Дома печати в Казани. И образное решение, и общее пространственное построение, и композиция фасадов, и даже детали проектов – едины и несут печать авторства инженера-строителя С.С. Пэна.

Список литературы

1. Мирхасанов, Р.Ф. От «чугунной архитектуры» к металлическому каркасу / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1 (54). – С. 178–185.
2. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.
3. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты проведения предпроектных работ на объектах культурного наследия / И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, А.Р. Гайдук, Т.А. Глебова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 678–688.
4. Каракова, Т.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы / Т.В. Каракова, А.В. Данилова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 211–219.
5. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.

6. Хакимов, Д.Р. Особенности сохранения и приспособления объектов культурного наследия к современным условиям / Д.Р. Хакимов, А.Ф. Требухин // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 57.
7. Лызина, А.Г. Средовые условия восприятия православных храмов и комплексов / А.Г. Лызина // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 4 (45). – С. 87–93.
8. Макаревич, Е.А. Объект истории архитектуры и культурного наследия: часовня Николая Чудотворца в Мелойгубе (Республика Карелия) / Е.А. Макаревич, Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2(51). – С. 175–183. – DOI 10.54734/20722958_2022_2_175
9. Гойкалов, А.Н. Разработка метода оценки качества архитектурно-исторической среды / А.Н. Гойкалов, Т.В. Макарова, А.Ю. Семенихина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1(39). – С. 73–79. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-73-79
10. Кузин, Н.Я. Оценка влияния внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий / Н.Я. Кузин, С.Г. Багдоев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2 – С.79–82.

References

1. Mirkhasanov, R.F. From «cast-iron architecture» to a metal frame / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 1 (54). – P. 178–185.
2. Lapshina, E.G. The concept of the architectural space of cities: a dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022.– No. 4 (53). – P. 170–176.
3. Garkin, I.N. Some aspects of pre-project work on cultural heritage sites / I.N. Garkin, L.S. Sabitov, A.R. Gaiduk, T.A. Glebova // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – No. 11 (95). – P. 678–688.
4. Karakova, T.V. Artistic perforation as a tool for shaping the architecture of a public building in the context of system emergence / T.V. Karakova, A.V. Danilova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 211–219.
5. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.
6. Khakimov, D.R. Features of preservation and adaptation of cultural heritage objects to modern conditions / D.R. Khakimov, A.F. Trebukhin // Bulletin of the Eurasian Science. – 2019. – Vol. 11, No. 1. – P. 57.
7. Lyzina, A.G. Environmental conditions for the perception of Orthodox churches and complexes / A.G. Lyzina // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, No. 4 (45). – P. 87–93.
8. Makarevich, E.A. Object of the history of architecture and cultural heritage: the chapel of St. Nicholas the Wonderworker in Meloygub (Republic of Karelia) / E.A. Makarevich, L.F. Selyutina // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 175–183. – DOI 10.54734/20722958_2022_2_175
9. Goikalov, A.N. Development of a method for assessing the quality of the architectural and historical environment / A.N. Goikalov, T.V. Makarova, A.Yu. Semenikhina // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea. – 2022. – No. 1 (39). – P. 73–79. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-73-79
10. Kuzin, N.Ya. Assessment of external factors on the bearing capacity of structures of civil buildings / N.Ya. Kuzin, S.G. Bagdоеv // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 2. – P. 79–82.