

**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)

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

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 использо-
вание в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

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

Подписано к печати 16.03.2026.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 24,875. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ №19.

Дата выхода в свет 23.03.2026.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1 (66)/2026

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 7

Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г.
ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ КАРБОНАТНЫХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ, РАЗМОЛОТЫХ
С ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ 7

Варенцов В.К., Кошев А.Н., Кузина В.В.
МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ
ТРЕХМЕРНЫХ КАТОДОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ
ПО ТОЛЩИНЕ ЭЛЕКТРОДА
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ И УДЕЛЬНОЙ
РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 17

Зайцева М.В., Куимова Е.И., Логанина В.И.
ВЫБОР ПОСТАВЩИКА СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ: МЕТОД
ПОПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ 27

Гришина А.Н.
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ..... 34

Сидоренко Ю.В., Фролов Е.И.
ЦЕМЕНТСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ОСАДОЧНЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ 48

Москвин Р.Н., Белякова Е.А.
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОБОСНОВАННОСТЬ
ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЧЕРЕЗ
ДИФфуЗИОННО-РАСТВОРНЫЙ МЕХАНИЗМ
ТВЕРДЕНИЯ ШЛАКОМИНЕРАЛЬНЫХ
КОМПОЗИТОВ..... 59

Гарькина И.А., Языев С.Б., Артемьев Д.А.
РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД
ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ 67

**Очкин И.А., Грейсух Г.И.,
Захаров О.А., Очкина Н.А.**
ВЫСОКОПЛОТНЫЕ ШТУКАТУРНЫЕ
РАСТВОРЫ (СМЕСИ) ОСОБОГО
НАЗНАЧЕНИЯ 76

© Авторы публикаций, 2026

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2026

© ПГУАС, 2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	83	Баканова С.В. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ С ПЛОТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ: ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	138
Калашников С.Ю., Шведов Е.Г., Машакарян А.С. ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС СЖИМАЕМОГО СТЕРЖНЯ С НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБЬЮ, ПРИБРЕТАЮЩЕГО ИНДУЦИРОВАННУЮ АНИЗОТРОПИЮ .	83	Князев А.А., Рожков В.С. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕАГЕНТНО-ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЩЕЛОЧНОГО РАСТВОРА ФЕРРАТА НАТРИЯ	146
Шенин А.И., Зайцев М.Б. ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ЭТОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	94	АРХИТЕКТУРА.....	154
Овчинников И.И., Валиев Ш.Н., Овчинников И.Г., Ахмаджанов М.З. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МОСТОВОГО ПОЛОТНА АВТОДОРОЖНОГО МОСТА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД.....	102	Лапшина Е.Г., Усанов Н.С. ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В СИСТЕМЕ СУБЦЕНТРОВ КРУПНОГО ГОРОДА: ЗАПАДНЫЙ ЖИЛОЙ РАЙОН ПЕНЗЫ	154
Карпов В.Н. ПАНЕЛИ ПЕРЕКРЫТИЯ С КЛЕЕНЫМИ НЕСУЩИМИ РЕБРАМИ ИЗ НИЗКОСОРТНОЙ ДРЕВЕСИНЫ	113	Герасимов В.П. ТИПОЛОГИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ	165
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	120	Гарькин И.Н., Викторова О.Л. АНАЛИЗ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: КОНЦЕПЦИЯ «СДВИГ БАЗОВОЙ ЛИНИИ».....	174
Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Лебединский К.В., Алексеев Д.П. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД	120	Карабанова Н.Ю., Акимова М.С. «ОРГАНИЧЕСКОЕ» РАЗВИТИЕ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ ГОРОДА В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНО- АНТРОПОГЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ	182
Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПО ТИПУ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ	127	Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Ганизода Ш.Н. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	192

Contents

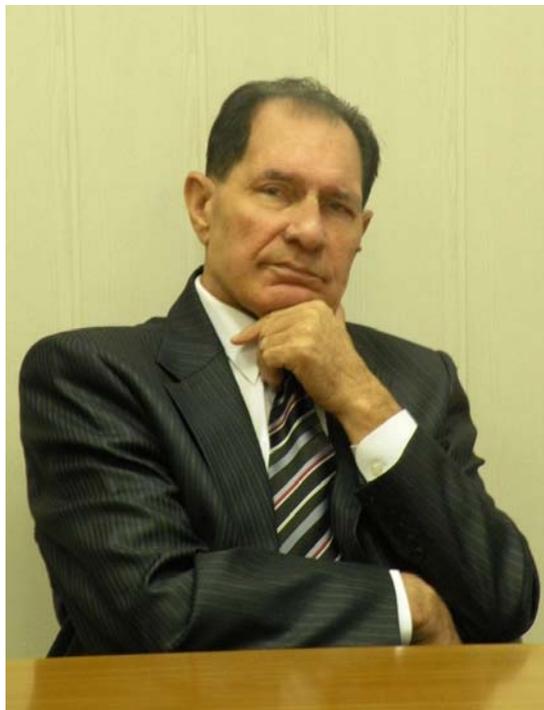
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	7	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	83
Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. DISPERSED COMPOSITION OF CARBONATE FILLERS, GROUND WITH PLASTICIZING ADDITIVES	7	Kalashnikov S.Yu., Shvedov E.G., Mashakaryan A.S. VERIFICATION OF COMPUTATIONAL MODELS FOR DETERMINING THE STRESS-STRAIN STATE OF A COMPRESSIBLE ROD WITH AN INITIAL BEND ACQUIRING INDUCED ANISOTROPY	83
Varentsov V.K., Koshev A.N., Kuzina V.V. METALLIZATION OF THREE- DIMENSIONAL FLOW-THROUGH CATHODES WITH ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SPECIFIC REACTIVE SURFACE DISTRIBUTED ACROSS THE THICKNESS.....	17	Shein A.I., Zaitsev M.B. HIGH-RISE BUILDING RESPONSE ON SEISMIC IMPACT WHEN VARYING THE PARAMETERS OF ITS ACTION.....	94
Zaytseva M.V., Kuimova E.I., Loganina V.I. CHOOSING A SUPPLIER OF DRY BUILDING MIXES: THE METHOD OF PAIRWISE COMPARISONS	27	Ovchinnikov I.I., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.G., Akhmadjanov M.Z. MODELING THE BEHAVIOR OF A HIGHWAY BRIDGE WITH DIFFERENT TYPES OF ROAD PAVEMENTS.....	102
Grishina A.N. SCIENTIFIC BASIS FOR PRODUCING SPECIAL-PURPOSE COMPOSITE MATERIALS	34	Karpov V.N. FLOOR PANELS WITH GLUED CARRIAGE RIBS MADE OF LOW-GRADE WOOD	113
Sidorenko Yu.V., Frolov E.I. CEMENT-CONTAINING MATERIALS WITH WASTES OF SEDIMENTARY MIDDLE VOLGA'S REGION ROCKS.....	48	ENGINEERING SYSTEMS.....	120
Moskvin R.N., Belyakova E.A. TOPOLOGICAL VALIDITY OF STRENGTH FORMATION THROUGH THE DIFFUSION- SOLUTION HARDENING MECHANISM OF SLAG-MINERAL COMPOSITES.....	59	Andreev S.Yu., Safronov M.A., Lebedinsky K.V., Alekseev D.P. NEW TECHNOLOGY OF COMPRESSION- VACUUM FLOTATION WASTEWATER TREATMENT	120
Garkina I.A., Yazyev S.B., Artemyev D.A. RISK-BASED APPROACH TO ASSESSING THE QUALITY OF BUILDING MATERIALS.....	67	Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A. RATIONALE FOR THE USE OF DISPLACEMENT VENTILATION AIR CONDITIONING SYSTEMS FOR WORSHIP HALLS OF WORSHIP BUILDINGS.....	127
Ochkin I.A., Greisukh G.I., Zakharov O.A., Ochkina N.A. HIGH-DENSITY PLASTER MIXES FOR SPECIAL PURPOSES.....	76	Bakanova S.V. AERODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES IN DENSELY POPULATED SPACES: PHYSICAL MODELING.....	138

Кныазев А.А., Рожков В.С. STUDIES OF THE REAGENT-FLOTATION WASTEWATER TREATMENT PROCESS AT A MEAT PROCESSING PLANT USING AN ALKALINE SOLUTION OF SODIUM FERRATE.....	146	Гаркин И.Н., Викторова О.Л. RISK ANALYSIS IN ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF CULTURAL HERITAGE SITES: THE BASELINE SHIFT CONCEPT	174
ARCHITECTURE.....	154	Карabanova N.Yu., Akimova M.S. «ORGANIC» DEVELOPMENT OF RESIDENTIAL CITY AREAS UNDER NATURAL AND ANTHROPOGENIC CONSTRAINTS.....	182
Лapshina E.G., Usanov N.S. TRANSFORMATION OF PUBLIC SPACES IN THE SYSTEM OF LARGE CITY SUBCENTERS: THE WESTERN RESIDENTIAL AREA IN PENZA.....	154	Derina M.A., Petryanina L.N., Ganizoda Sh.N. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE URBAN ENVIRONMENT FOR DESIGNING	192
Герасимов В.П. TYPOLOGY OF SMALL ARCHITECTURAL FORMS MADE OF WOOD-BASED MATERIALS.....	165		

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР С ДУШОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ И СЕРДЦЕМ НАСТАВНИКА

Дело науки – служить людям.

Л.Н. Толстой



В мире академической науки есть имена, которые значат гораздо больше, чем строчки в дипломе или перечень званий. Имя Александра Максимовича Данилова – основателя и бессменного главного редактора журнала «Региональная архитектура и строительство» – именно из этого ряда. Доктор технических наук, профессор, советник РААСН, член-корреспондент МАНЭБ. Но прежде всего – человек, для которого наука стала делом жизни, а журнал – настоящим детищем, выращенным с отцовской заботой.

Принципиальность, эрудиция, твёрдость решений, умение слышать других и одновременно вести за собой – те качества, которые формировались не в тиши кабинетов, а в самой гуще жизни. Его путь – яркий пример того, как выходец из многолетней сельской семьи, шестой ребёнок, с детства познавший и холод, и голод, сумел подняться к вершинам академической мысли.

Из провинции в большую науку

Александр Данилов родился 18 июля 1938 года в селе Илим-Гора, Неверкинского района, Пензенской области. Время было суровое: страна ещё помнила сталинские репрессии, а деревня жила в постоянной нужде. Уже в 12 лет он принимает взрослое решение – уехать из родительского дома и начать самостоятельную жизнь. Учёба в Ульяновском педагогическом училище стала первым шагом. В отличие от сверстников, которые после получения профессии учителя торопились на работу в школу, юноша чувствовал: его дорога – в науку!

Вернувшись после окончания училища в 1955 году в Пензу, он поступает в педагогический институт на физико-математический факультет. Учится с увлечением, активно участвует в жизни факультета.

Казань: небо, расчёты и характер

На четвёртом курсе поступает предложение, которое всё меняет: переход в Казанский авиационный институт. Александр Максимович соглашается – и, как сам позже признавался, никогда об этом не жалел. Эти годы он считал огромной удачей. Работа в Центральном конструкторском бюро Казанского оптико-механического завода стала для него школой высшего пилотажа в прямом и переносном смысле. С 1963 по 1976 год он прошёл путь от рядового инженера-конструктора до начальника отдела. В 1972 году, совмещая напряжённую работу на производстве с исследовательской деятельностью, защитил кандидатскую диссертацию по закрытой тематике, связанной с автоматическим управлением.

Пенза. Кафедра. Дело всей жизни

В 1976 году Данилов возвращается на малую родину. В Пензенском инженерно-строительном институте (ныне ПГУАС) начинается новый этап его жизни. За три года – стремительный взлёт от старшего преподавателя до заведующего кафедрой высшей математики. Коллеги вспоминают: это была не просто карьера, а служение. Он умел увлечь, зажечь, повести за собой. Женский коллектив кафедры – особая гордость профессора: суметь на протяжении десятилетий сохранить атмосферу тепла, уважения и взаимопомощи под силу только по-настоящему сильному и чуткому руководителю. В 1990 году Александру Максимовичу присвоено звание профессора, а в 1998-м он защищает докторскую диссертацию в области управления техническими системами. Он заведовал кафедрой до 2023 года, оставаясь для многих не просто начальником, а наставником, мудрым советчиком и даже «академической совестью» вуза. Под его руководством было защищено несколько кандидатских и докторских диссертаций.

Его имя широко известно в научных кругах. Направления его научной деятельности: системный анализ, управление в технических системах, идентификация динамических систем, управление в пространстве, системный подход к синтезу композитов, математическое моделирование и программные комплексы для строительной отрасли. Более 400 научных трудов, 11 монографий, 12 учебных пособий – за этими цифрами стоит неутомимая жажда нового. Александр Максимович никогда не почивал на лаврах, не оглядывался на уже пройденное. Он стремился идти в ногу со временем – и вёл за собой других. Именно эта устремлённость в будущее привела его к созданию научно-технического журнала «Региональная архитектура и строительство», который стал не просто периодическим изданием, а ценной научной площадкой, объединившей инженеров, математиков, архитекторов и строителей. Александр Максимович буквально до последних дней редактировал статьи, поступающие в портфель журнала, переживая за выпуск каждого номера.

Сегодня имя профессора Данилова – это знак качества в мире региональной науки. И каждый, кому посчастливилось работать рядом с ним, писать под его руководством статьи или просто слушать его выступления, сохранит в своей памяти частицу его мудрости, принципиальности и человеческого тепла. Таким он останется в истории журнала, университета и в сердцах тех, кого коснулась его судьба.

Светлая память о Данилове Александре Максимовиче, главном редакторе, замечательном человеке, талантливым ученом и педагоге, сохранится в наших сердцах.

*Редакционная коллегия
журнала «Региональная архитектура
и строительство»*

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 661.8°062.2:66.063.6:666.972.162

DOI 10.54734/20722958_2026_1_7

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1,
тел.: +7 (962) 5698709

Беляков Андрей Юрьевич,
аспирант, заведующий лабораторией
кафедры «Технологии строительных
материалов, изделий и конструкций»
E-mail: belyakoffandrrey@mail.ru

Хохряков Олег Викторович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технологии
строительных материалов, изделий
и конструкций»
E-mail: olvik@list.ru

Хозин Вадим Григорьевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
строительных материалов, изделий
и конструкций»
E-mail: khozin.vadim@yandex.ru

*Kazan State University of Architecture
and Civil Engineering*
Russia, 420043, Kazan, 1, Zelenaya St.,
tel.: +7 (962) 5698709

Belyakov Andrey Yuryevich,
Postgraduate Student, Head of the Laboratory
of the Department «Technology of Building
Materials, Products and Structures»
E-mail: belyakoffandrrey@mail.ru

Khokhryakov Oleg Viktorovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department «Technology
of Building Materials, Products and
Structures» E-mail: olvik@list.ru

Khozin Vadim Grigorievich,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor of the Department «Technology
of Building Materials, Products and
Structures» E-mail: khozin.vadim@yandex.ru

ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ КАРБОНАТНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ, РАЗМОЛОТЫХ С ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

А.Ю. Беляков, О.В. Хохряков, В.Г. Хозин

Важнейшей характеристикой таких тонкомолотых строительных материалов, как портландцемент и минеральные добавки, является дисперсный состав, существенно определяющий структурообразование и комплекс свойств современных бетонов. Особый интерес представляют карбонатные наполнители (известняки и доломиты), поскольку они уменьшают водопотребность, расслаиваемость и водоотделение бетонных смесей, повышают их пластичность, плотность, однородность, снижают усадку и тепловыделение при твердении. Была выполнена сравнительная оценка дисперсных составов портландцемента и трех видов известняков с разной прочностью, которые были размолоты с пластифицирующими добавками. Показано, что эти добавки, несмотря на высокую интенсивность измельчения известняков, способствуют дополнительному ускорению их размолоспособности до 10 %. Дисперсный состав порошков портландцемента и известняков Миньярского и Чодраяльского карьеров характеризуется гистограммой в виде мономодального симметричного распределения частиц. Гистограмма порошка известняка Михайловского карьера представляет собой бимодальное распределение с двумя модами со значениями 300 и 18 мкм. При этом с ростом

удельной поверхности образуется третья мода в диапазоне высокодисперсных частиц размером 0,1-0,5 мкм.

Ключевые слова: дисперсный состав, портландцемент, карбонатные наполнители, размолоспособность, пластифицирующие добавки

DISPERSED COMPOSITION OF CARBONATE FILLERS GROUND WITH PLASTICIZING ADDITIVES

A.Yu. Belyakov, O.V. Khokhryakov, V.G. Khozin

The most important characteristic of such finely ground building materials as Portland cement and mineral additives is their dispersed composition, which significantly determines the structure formation and the complex of properties of modern concrete. Carbonate fillers (limestones and dolomites) are of particular interest, since they reduce water demand, stratification and water separation of concrete mixtures, increase their plasticity, density, homogeneity, reduce shrinkage and heat release during hardening. The paper presents a comparative assessment of the dispersed compositions of Portland cement and three types of limestone with different strength, which were ground with plasticizing additives. It is shown that these additives, despite the high intensity of limestone grinding, contribute to additional acceleration of their grindability up to 10 %. The dispersed composition of Portland cement powders and limestones from the Mynar and Chodrayal quarries is characterized by a histogram in the form of a monomodal symmetrical distribution of particles. The histogram of the Mikhailovsky quarry limestone powder is a bimodal distribution with two modes with values of 300 and 18 μm . At the same time, with an increase in the specific surface a third mode is formed in the range of highly dispersed particles of 0.1-0.5 μm .

Keywords: dispersed composition, cement, carbonate fillers, grinding capacity, plasticizing additives

Введение. Современная технология получения порошкообразных строительных материалов, таких, как портландцемент и минеральные добавки, неразрывно связана с оценкой их качества. Важнейшее практическое значение в этой связи имеет определение дисперсного состава, поскольку он существенно влияет на свойства этих материалов и, соответственно, бетонов на их основе [1,2].

Как правило, в современных стандартах (ГОСТ 31108, ГОСТ 30744) дисперсный состав не нормируется, тем не менее большинство предприятий по производству портландцемента контролируют отдельные размеры частиц по остаткам на ситах, но в целом оценивают только тонкость помола по удельной поверхности. А, как известно [3-5], дисперсный состав как портландцемента, так и минеральных добавок оказывает существенное влияние на формирование микроструктуры цементного камня. Оно напрямую связано с взаимодействием частиц вяжущего и добавок различной степени помола между собой и с водой. Высокодисперсные частицы (до 5 мкм) характеризуются ранней реакционной способностью и ускоренной гидратацией, тогда как частицы среднего размера (5-30 мкм) активизируются на относительно поздних стадиях твердения. Частицы размером свыше 30 мкм называют «балластными», поскольку они практически не участвуют в процессе гидратации [6].

С другой стороны, в современных бетонах наряду с портландцементом широко применяют минеральные добавки различного дисперсного состава с целью увеличения объема реологической матрицы и повышения эффективности действия суперпластификаторов [7, 8]. Особенно это касается карбонатсодержащих добавок, размалываемых до удельной поверхности 4000-6000 $\text{см}^2/\text{г}$ и имеющих средний размер частиц 5-15 мкм. Они уменьшают водопотребность, расслаиваемость и водоотделение бетонных смесей, повышают их пластичность, плотность, однородность, снижают усадку и тепловыделение при твердении, их водопоглощение [9, 10].

Наиболее перспективным технологическим приёмом повышения эффективности карбонатных наполнителей является способ функционализации, заключающийся в механическом «нанесении» суперпластификатора, как поверхностно-активного вещества (ПАВ), на минеральные частицы путём совместного помола. При «закреплении» суперпластификатора на поверхности частиц не только обеспечивается дезагрегация и

повышается размолоспособность, но и усиливается пластификация минерально-водных систем [11]. Тонкодисперсные частицы функционализированных наполнителей становятся реологически активными, повышающими удобоукладываемость и формуемость бетонных смесей. С другой стороны, широкий диапазон дисперсного состава порошков с разноразмерными частицами способствует повышению плотности их упаковки, что положительно влияет на физико-механические свойства бетона [12]. При этом оптимизация составов тонкодисперсных минеральных компонентов (портландцемента и минеральных наполнителей) улучшает однородность структуры и равномерность распределения напряжений при внешнем приложении нагрузки [13-15].

Таким образом, оценка дисперсного состава портландцемента и минеральных добавок играет важнейшую роль в структурообразовании бетонов. В связи с этим целью нашей работы явился сравнительный анализ дисперсного состава портландцемента и различных карбонатных наполнителей (известняков), функционализированных пластифицирующими добавками путём совместного измельчения. На основании этого были сформулированы следующие задачи:

1) определение размолоспособности и удельных энергозатрат известняков с различными пластифицирующими добавками;

2) оценка распределения частиц по размерам порошков известняков.

Материалы и методы исследования. В работе были использованы следующие материалы:

1) Известняк производства ООО «Миньярский карьер» (Челябинская область, г. Миньяр), обладающий следующими физико-техническими показателями: крупность фракций 5-20 мм, марка по дробимости зёрен 1000-1200, содержание илстых и глинистых частиц 1,8 %. Его химический состав представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав известняка Миньярского карьера, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	Потеря при прокаливании
1,63	0,10	0,05	0,25	53,1	1,34	0,05	0,28	43,16

2) Известняк Михайловского карьера производства ООО «Михайловский известняк» (Свердловская область, г. Михайловск) с крупностью зёрен 5-20 мм, маркой по дробимости 600-800, содержание илстых и глинистых частиц 0,6 %. Химический состав представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Химический состав известняка Михайловского карьера, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	Потеря при прокаливании
0,14	0,01	0,054	54,04	0,42	0,04	0,02	45,06

3) Доломитизированный известняк Чодраяльского месторождения, поставляемый ООО «Партнёр» (Республика Татарстан, г. Казань). Известняк имеет крупность зёрен в интервале 5-20 мм, марка по дробимости 400, содержание илстых и глинистых частиц 5,9 %. Химический состав представлен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Химический состав доломитизированного известняка Чодраяльского месторождения, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Потеря при прокаливании
1,24	0,07	0,06	30,29	20,29	0,21	0,14	47,31

4) Портландцементный клинкер ООО «Холсим (Рус)» (Саратовская область, г. Вольск) фракции 5-40 мм со следующим минералогическим составом: C₃S – 73,0 %, C₂S – 8,7 %, C₃A – 5,3 %, C₄AF – 11,6 %. Испытания товарного клинкера в соответ-

ствии с ГОСТ 34850-2022 показали, что его средняя активность варьируется от 47 до 50 МПа. Химический состав представлен в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Химический состав цементного клинкера (г. Вольск), %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Примеси
20,68	4,56	4,14	65,03	3,13	2,46

В качестве пластифицирующих добавок для функционализации карбонатных наполнителей были выбраны следующие порошкообразные добавки различной химической природы:

1) лигносульфонат натрия технический «Полипласт Лигно», АО «ГК Полипласт», относящийся к классу пластифицирующих добавок (ГОСТ 24211). Выпускается в форме водорастворимого порошка от светлого до темно-коричневого цвета, pH 10 %-го раствора 5,4;

2) полинафталинметилсульфонат натрия СП-1, АО «ГК Полипласт», относящийся к классу суперпластифицирующих добавок (ГОСТ 24211). Выпускается в форме водорастворимого порошка коричневого цвета, pH 10 %-го раствора 7,3;

3) модифицированный эфир поликарбоксилата РС-1701, ООО «Новый мир», относящийся к классу суперпластифицирующих добавок (ГОСТ 24211). Представляет собой сыпучий порошок белого цвета, pH 10 %-го раствора 6,1.

Помол материалов осуществляли в лабораторной центробежно-планетарной мельнице «Активатор 4т» (ЗАО «Активатор», г. Новосибирск), имеющей четыре помольных цилиндрических барабана объемом 1300 мл каждый. Мощность привода мельницы – 15 кВт, скорость вращения барабанов – 50...1200 об/мин, масса навески на помол – 200 г. Принцип работы заключается во вращении четырех барабанов относительно центральной оси и вокруг собственной оси в противоположную сторону вращения ротора мельницы.

Удельную поверхность ($S_{уд}$) определяли на приборе дисперсионного анализа ПСХ-10А, работающем по методу газопроницаемости Козени и Кармана. Газопроницаемость слоя порошка устанавливали по продолжительности фильтрации через него воздуха при фиксированном начальном и конечном разрежении в рабочем объеме прибора. Для расчета удельной поверхности и среднего размера частиц использовали истинную плотность материала, его массу и высоту слоя порошка в кювете.

Для количественной оценки эффективности помола были введены следующие критерии [15]:

1. Коэффициент размолоспособности, м²/мин:

$$K_{разм} = (S_{кон} - S_{исх}) \times m / \Delta\tau, \quad (1)$$

где $S_{исх}$ – удельная поверхность в начальное время τ_1 , м²/кг; $S_{кон}$ – удельная поверхность через определенное время помола τ_2 , м²/кг; $\Delta\tau$ – время помола ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$), мин; m – масса измельчаемого материала, кг.

2. Удельные энергозатраты (\mathcal{E} , кВт·ч/м²) на прирост единицы удельной поверхности (м²/кг):

$$\mathcal{E} = N \times \Delta\tau / (m \times \Delta S), \quad (2)$$

где N – мощность электродвигателя мельницы, кВт; $\Delta\tau$ – время помола, ч; ΔS – прирост удельной поверхности ($\Delta S = S_{кон} - S_{исх}$), м²/кг, за время помола $\Delta\tau$.

Распределение частиц по размерам (РЧР) и их форма в дисперсных системах определяется с помощью анализаторов частиц Horiba LA-960. Принцип работы основан на рассеивании и детектировании отраженного/преломленного лазерного света, красного и синего спектров (650 и 405 нм), в соответствии с ISO 13320-1.

Результаты и их обсуждение. Для оценки зависимости дисперсного состава от продолжительности измельчения и вида пластифицирующей добавки известняки размалывали в мельнице до различной удельной поверхности: без добавок – до 300,

550 и 800 м²/кг; с добавками – до 550 м²/кг. В процессе помола фиксировали время, которое понадобилось для достижения этих значений, а также рассчитывали коэффициент размолоспособности и удельные энергозатраты. Дополнительно определяли удельную поверхность портландцемента для сравнения с молотыми известняками.

Виды известняков, содержание добавок и количественная оценка эффективности помола представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Количественная оценка эффективности помола портландцементного клинкера и известняков

Наименование минерального материала	Вид добавки/ % от массы минерального материала	Время помола t , мин	Удельная поверхность, м ² /кг		Коэффициент размолоспособности $K_{разм}$, м ² /мин	Удельные энергозатраты $\dot{E} \cdot 1000$, кВт·ч/м ²
			исходная $S_{исх}$	конечная $S_{кон}$		
Портландцемент	-	-	410±5	-	-	-
Известняк Миньярского карьера	-	1,2	30±5	300±5	45,0	5,6
	-	2,9		550±5	35,9	7,0
	-	5,1		800±5	30,2	8,3
	Полипласт Лигно/2	2,8		550±5	37,1	6,7
	СП-1/2	2,8		550±5	37,1	6,7
	РС-1701/0,8	2,7		550±5	38,5	6,5
Известняк Михайловского карьера	-	1		300±5	54,0	4,6
	-	2,2		550±5	47,3	5,3
	-	4		800±5	38,5	6,5
	Полипласт Лигно/2	2,1		550±5	49,5	5,0
	СП-1/2	2,1		550±5	49,5	5,0
	РС-1701/0,8	2		550±5	52,0	4,8
Известняк Чодраяльского карьера	-	0,8	300±5	67,5	3,7	
	-	1,9	550±5	54,7	4,6	
	-	3,4	800±5	45,3	5,5	
	Полипласт Лигно/2	1,8	550±5	57,8	4,3	
	СП-1/2	1,8	550±5	57,8	4,3	
	РС-1701/0,8	1,7	550±5	61,2	4,1	

Из табл. 5 следует, что известняки, являющиеся по происхождению относительно «слабыми» горными породами, весьма интенсивно размалываются в энергонапряженной мельнице. Например, наибольшая продолжительность измельчения для достижения удельной поверхности 550 м²/кг составляет всего 2,8 мин. Особенно быстро измельчается известняк Чодраяльского карьера, о чём свидетельствуют самый высокий коэффициент размолоспособности (67,5 м²/мин) и низкие удельные энергозатраты (3,7 кВт·ч/м²). Несмотря на высокую интенсивность измельчения известняков, видно, что пластифицирующие добавки способствуют дополнительному ускорению их размолоспособности до 10 %, поскольку возрастают количественные показатели эффективности помола ($K_{разм}$ и \dot{E}).

Далее с помощью лазерного анализатора HORIBA LA-960 определили распределение частиц по размерам известняковых порошков, представляющее собой столбчатую гистограмму зависимости относительного содержания фракций частиц q (%) от их диаметра d (%). Измерение проводили в течение 30-60 с на пробе массой до 0,5 г, которую засыпали порционно в 2-4 приема в загрузочную камеру анализатора. Для деагломерации частиц порошки подвергали ультразвуковой обработке в течение

1 мин. Результаты оценки дисперсного состава порошков портландцемента и трёх известняков представлены на рис. 1–4.

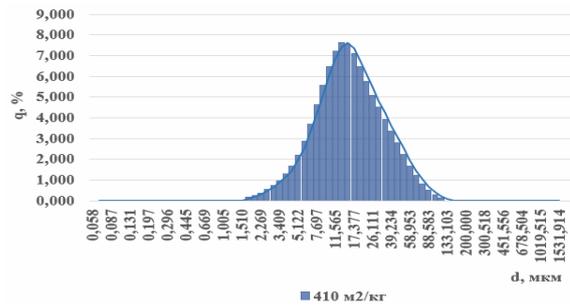


Рис. 1. Распределение частиц по размерам портландцемента с удельной поверхностью 410 м²/кг

Как видно из рис. 1, дисперсный состав портландцемента с удельной поверхностью 410 м²/кг имеет мономодальное распределение с диапазоном частиц в интервале от 1 до 130 мкм. Гистограмма имеет симметричный вид с максимумом частиц посередине, соответствующих диаметру 14 мкм и содержанию 7,6 %.

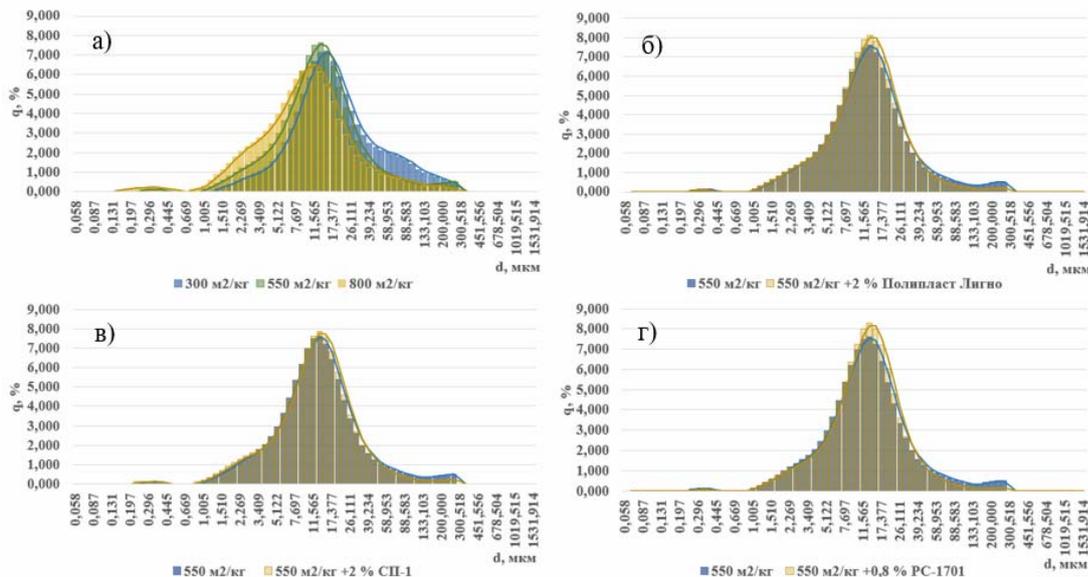


Рис. 2. Распределение частиц по размерам известняка Миньярского карьера: а – $S_{уд}=300, 550$ и 800 м²/кг; б – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой «Полипласт Лигно»; в – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой СП-1; г – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой РС-1701

Как видно из рис. 2, распределение частиц известняка Миньярского карьера, размолотого как с пластифицирующими добавками, так и без них, также представляет собой гистограмму симметричного вида с диапазоном частиц от 1 до 300 мкм. С увеличением удельной поверхности от 300 до 800 м²/кг (рис. 2, а) гистограмма «сдвигается» влево. При этом максимум диаметра частиц уменьшается с 15 до 9 мкм, а их содержание снижается с 7,1 до 6,2 %. Кроме того, на гистограмме видны высокодисперсные частицы с размером в интервале от 0,1 до 0,5 мкм, однако их количество весьма незначительное. Интересно, что вид РЧР известняка (рис. 2, б, в, г) практически не меняется в зависимости от типа пластифицирующей добавки, с которой его измельчали. Эффективность добавок проявляется лишь в ускорении размолоспособности известняка.

Схожий вид с размолотым известняком Миньярского карьера имеет распределение частиц по размерам известняка Чодраяльского карьера (рис. 3, а). Оно также представляет собой мономодальную гистограмму, однако имеет относительно пологий вид.

При этом наибольшее содержание одноразмерных частиц при удельной поверхности 300, 550 и 800 м²/кг составило 5,6, 5,5 и 4,3 % при диаметре 18, 12 и 7 мкм соответственно. Кроме того, с увеличением удельной поверхности возрастает содержание высокодисперсных частиц с максимумом в интервале 0,3-0,4 мкм. При добавлении пластифицирующих добавок характер распределения частиц практически идентичный (рис. 3, б, г, в). Происходит лишь ускорение размолоспособности известняка.

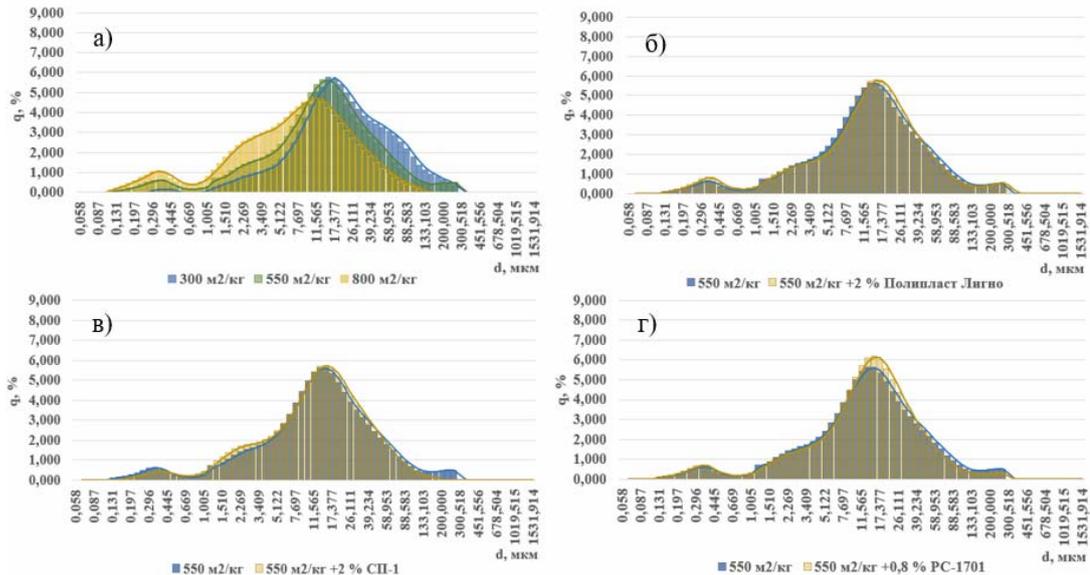


Рис. 3. Распределение частиц по размерам известняка Чодраяльского карьера: а – $S_{уд}=300, 550$ и 800 м²/кг; б – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой «Полипласт Лигно»; в – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой СП-1; г – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой PC-1701

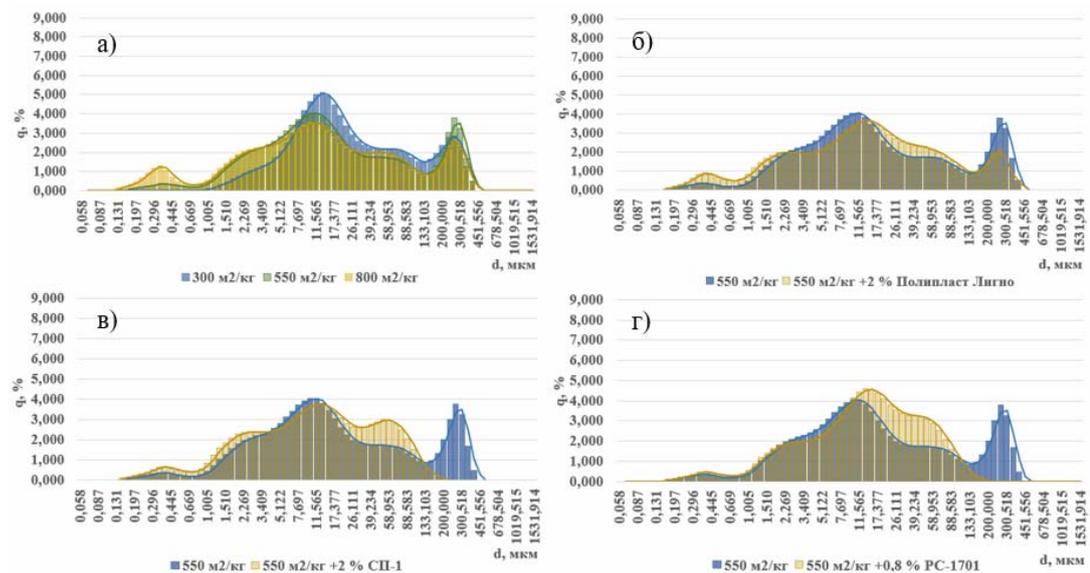


Рис. 4. Распределение частиц по размерам известняка Михайловского карьера: а – $S_{уд}=300, 550$ и 800 м²/кг; б – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой «Полипласт Лигно»; в – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой СП-1; г – $S_{уд}=550$ м²/кг с добавкой PC-1701

Иной вид распределения частиц по размерам имеет порошок известняка Михайловского карьера (рис. 4, а). Видно, что при удельной поверхности 300 м²/кг гистограмма имеет бимодальный вид с двумя характерными модами 300 и 18 мкм. При дальнейшем увеличении удельной поверхности (550 и 800 м²/кг) наибольший диаметр частиц первой моды практически не изменяется (~300 мкм), а второй моды – смещается к меньшим значениям (12 и 11 мкм соответственно). Закономерно

снижается содержание этих частиц до 5 и 3,5 %. Другой особенностью гистограммы является образование третьей моды в диапазоне высокодисперсных частиц размером 0,1-0,5 мкм.

В отличие от первых двух известняков пластифицирующие добавки существенно изменяют РЧР известняка (рис. 4, б, в, г). Так, при совместном помоле известняка с добавкой «Полипласт Лигно» до удельной поверхности 550 м²/кг значительно сокращается число крупных частиц размером ~300 мкм, а с добавками СП-1 и РС-1701 – они полностью размалываются. Можно заключить, что известняк Михайловского карьера при помоле без пластифицирующих добавок склонен к образованию агломератов, которые при добавлении этих добавок дезагрегируются, а РЧР стремится от трёхмодального к бимодальному виду с возрастанием моды в диапазоне размеров частиц 0,1-0,5 мкм.

Заключение.

1. Установлены зависимости дисперсного состава трёх видов известняка от продолжительности их измельчения без и с пластифицирующими добавками. Известняки, являющиеся по происхождению относительно «слабыми» горными породами, весьма интенсивно размалываются, причём наиболее быстро измельчается малопрочный известняк Чодраяльского карьера. Несмотря на высокую интенсивность измельчения известняков, пластифицирующие добавки способствуют дополнительному ускорению их размолоспособности до 10 %, что подтверждается возрастанием количественных показателей эффективности помола ($K_{разм}$ и Δ).

2. Установлено, что дисперсный состав портландцемента характеризуется мономодальным симметричным распределением с диапазоном частиц в интервале от 1 до 130 мкм. Аналогичное симметричное распределение имеют гистограммы порошков известняка Миньярского и Чодраяльского карьеров с тем отличием, что для последнего гистограмма имеет относительно пологий вид. Иной вид распределения частиц по размерам у порошка известняка Михайловского карьера, а именно гистограмма имеет две характерные моды при 300 и 18 мкм. Второй особенностью гистограммы является то, что с ростом удельной поверхности образуется третья мода в диапазоне высокодисперсных частиц размером 0,1-0,5 мкм. Показано, что пластифицирующие добавки ускоряют размолоспособность первых двух известняков, а в известняке Михайловского карьера помимо ускорения происходит существенное уменьшение числа крупных частиц размером ~300 мкм, что свидетельствует об их деагломерации. При этом гистограмма изменяется от трёхмодального до бимодального вида с возрастанием моды в диапазоне размеров частиц 0,1-0,5 мкм.

Список литературы

1. Дворкин, Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский ; под ред. Л.И. Дворкина. – Киев : Будивельник, 1991. – 136 с. – ISBN 5-7705-0465-X.
2. Щербань, Е.М. Реологические свойства бетонных смесей на основе модифицированных минеральных дисперсий / Е.М. Щербань, С.А. Стельмах, А.К. Халюшев [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 20.
3. Ибрагимов, Р.А. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии / Р.А. Ибрагимов, Л.И. Потапова, Е.В. Королев // Известия КГАСУ. – 2021. – № 3 (57). – С. 41–49.
4. Тараканов, О.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ / О.В. Тараканов, Ю.Г. Иващенко, И.В. Ерофеева // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1(58). – С. 47–58.
5. Ермилова, Е.Ю. Термоактивированные смеси глин и известняка как комплексные добавки для композиционного портландцемента / Е.Ю. Ермилова, З.А. Камалова. // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2024. – № 4(9). – С. 46–53.

6. Ходаков, Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г.С. Ходаков. – Москва : Стройиздат, 1972. – 239 с.
7. 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. 70–75.
8. 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.
9. Тараканов, О.В. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, К.А. Стешкина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 40–46.
10. Ассакунова, Б.Т. Совместное воздействие карбонатной муки и пластифицирующих добавок на свойства бетона / Б.Т. Ассакунова, Т.Т. Болотов, И.К. Омурбеков, Ж. Аманжан Кызы // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2017. – № 3(57). – С. 147–150.
11. Гуляков, Е.Г. Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности / Е.Г. Гуляков, В.Г. Хозин, И.В. Боровских, Ю.М. Ганеева. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7 // Известия КГАСУ. – 2024. – № 2(68). – С. 77–91.
12. Гиззатуллин, А.Р. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах / А.Р. Гиззатуллин, Н.Н. Морозова, К.О. Нестерова // Полимеры в строительстве : научный интернет-журнал. – 2023. – № 1(11). – С. 47–57.
13. Макридин, Н.И. Структура и механические свойства цементных дисперсных систем : моногр. / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 340 с.
14. Петропавловских, О.К. Конструкции из композитов на цементной основе в мостостроении / О.К. Петропавловских, Х.С. Чопурян // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2024. – № 1 (5). – С. 43–52.
15. Хозин, В.Г. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, И.Р. Сибгатуллин. – Москва : Издательство АСВ, 2021. – 366 с.

References

1. Dvorkin, L.I. Cement concretes with mineral fillers / L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy, S.M. Chudnovsky ; Edited by L.I. Dvorkin. – Kiev : Budivelnyk, 1991. – 136 p. – ISBN 5-7705-0465-X.
2. Shcherban, E.M. Rheological Properties of Concrete Mixtures Based on Modified Mineral Dispersions / E.M. Shcherban, S.A. Stelmakh, A.K. Khalyushe, [et al.] // Bulletin of Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12, №. 2. – P. 20.
3. Ibragimov, R.A. Study of the structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy / R.A. Ibragimov, L.I. Potapova, E.V. Korolev // Bulletin of KSUACE. – 2021. – № 3 (57). – P. 41–49.
4. Tarakanov, O.V. Influence of carbonate mineral additives on the formation of microstructure and strength of mineral binders / O.V. Tarakanov, Yu.G. Ivaschenko, I.V. Erofeeva // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 1 (58). – P. 47–58.
5. Ermilova, E.Yu. Thermally activated mixtures of clays and limestone as complex additives for composite Portland cement / E.Yu. Ermilova, Z.A. Kamalova // Building structures, buildings and structures. – 2024. – №. 4(9). – P. 46–53.
6. Khodakov, G.S. Fine grinding of construction materials / G.S. Khodakov. – Moscow : Stroyizdat, 1972. – 239 p.
7. Kalashnikov, V.I. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, ground together with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Ta-

rakanov, D.V. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev // Construction Materials. – 2014. – № 9. – P. 70–75.

8. Tarakanov, O.V. Prospects for the use of complex additives in new generation concretes / O.V. Tarakanov, D.V. Kalashnikov // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2017. – №. 1 (39). – P. 223–229.

9. Tarakanov, O.V. Evaluation of the influence of carbonate microfiller on the kinetics of initial structure formation and the composition of hydrate phases of cement systems / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, K.A. Steshkina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №. 2. – P. 40–46.

10. Assakunova, B.T. Combined effect of carbonate flour and plasticizing additives on the properties of concrete / B.T. Assakunova, T.T. Bolotov, I.K. Omurbekov, Zh. Amanzhan Kyzy // Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov. – 2017. – №. 3 (57). – P. 147–150.

11. Gulyakov, E.G. The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water demand cements / E.G. Gulyakov, V.G. Khozin, I.V. Borovskikh, Y.M. Ganeeva. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7 // News KSUAE. – 2024. – № 2(68). – P. 77–91.

12. Gizzatullin, A.R. Functionalized fillers for use in cement concretes / A.R. Gizzatullin, N.N. Morozova, K.O. Nesterova // Polymers in construction: scientific online journal. – 2023. – №. 1 (11). – P. 47–57.

13. Makridin, N.I. Structure and Mechanical Properties of Cement Dispersed Systems: Monograph / N.I. Makridin, I.N. Maksimova. – Penza : PGUAS, 2013. – 340 p.

14. Petropavlovskikh, O.K. Structures from cement-based composites in bridge construction / O.K. Petropavlovskikh, Kh.S. Chopuryan // Automobile roads and transport infrastructure. – 2024. – №. 1 (5). – P. 43–52.

15. Khozin, V.G. “Carbonate” cements with low water demand / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, I.R. Sibgatullin. – Moscow : ASV Publishing House, 2021. – 366 p.

УДК 691 : 51-7

DOI 10.54734/20722958_2026_1_17

*Институт химии твердого тела
и механохимии Сибирского отделения РАН*
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18,
тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: vvk@ngs.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

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук
E-mail: koshev@pguas.ru

Кузина Валентина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

*Institute of Solid and Mechanochemistry of
the Siberian Branch of RAS*
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St.,
tel.: (383) 332-40-02

Varentsov Valery Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vvk@ngs.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

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor
of the Department «Information
and Computing Systems», Full member
of the New York Academy of Sciences
E-mail: koshev@pguas.ru

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information
and Computing Systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00135,
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ КАТОДОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПО ТОЛЩИНЕ ЭЛЕКТРОДА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ И УДЕЛЬНОЙ РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.В. Кузина

Приводятся результаты исследования процессов металлизации проточных трехмерных электродов из углеродных волокнистых материалов методами математического моделирования. Исследовано влияние переменной электропроводности и удельной реакционной поверхности на степень извлечения и распределение металла по толщине электрода. Показано решение задачи получения равномерных по толщине покрытий катодов металлами.

Ключевые слова: углеродные композиционные материалы, проточные трехмерные электроды, металлизация, электропроводность, реакционная поверхность, математическое моделирование, задача оптимизации

METALLIZATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW-THROUGH CATHODES WITH ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SPECIFIC REACTIVE SURFACE DISTRIBUTED ACROSS THE THICKNESS

V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.V. Kuzina

This paper presents a study of metallization processes on three-dimensional flow-through electrodes made of carbon fiber materials using mathematical modeling methods. The objective is to investigate the influence of electrical conductivity and specific reactive surface area varying with

thickness on the degree of metal extraction and distribution across the electrode thickness. A solution of the problem of obtaining uniform metal coatings on cathodes is presented.

Keywords: carbon composite materials, three-dimensional flow-through electrodes, metallization, electrical conductivity, reactive surface, mathematical modeling, optimization problem

Углеродные волокнистые материалы (УВМ) используются в процессах извлечения металлов из растворов переработки минерального и техногенного сырья на проточные трехмерные электроды (ПТЭ) при создании композиционных, электродных и каталитически активных материалов [1-13]. Разработка процессов электроосаждения связана с решением различных задач, обусловленных особенностями использования УВМ: равномерное осаждение заданного количества металла на волокнах материала, осаждение максимального количества металла на единицу массы УВМ, максимальное извлечение металла из раствора. Для осуществления этих процессов используются УВМ с различной удельной проводимостью и реакционной поверхностью. Кроме того, в ряде публикаций обосновываются идеи относительно использования таких УВМ для решения задач получения равномерных по толщине покрытий ПТЭ [1-6].

Одни из первых экспериментальных данных осаждения металлов на углеродные волокнистые электроды приведены в работах [9, 10]. В табл. 1 приведены результаты электроизвлечения золота из оксалатных растворов на проточные трехмерные электроды из УВМ различных марок [11]. Результаты исследований, приведенные в таблице, показывают, что использование углеродных волокнистых электродов с переменной по толщине электропроводностью и удельной реакционной поверхностью влияет как на степень извлечения, так и на распределение золота по толщине электрода и зависит не только от применяемых УВМ (КНМ – низкоэлектропроводный, нетканый; ВИНН – высокоэлектропроводный, нетканый, трикотаж – высокоэлектропроводный, тканый [9]), но и от их взаимного расположения по толщине электрода.

Т а б л и ц а 1

УВМ / количество слоев	Начальная концентрация золота, мг/л	Степень извлечения золота, %	Выход золота по току, %	Количество выделившегося золота, %
КНМ/2	380	99,84	6,45	Ф* – 18,10 Т – 81,90
КНМ+ВИНН/2+1	460	99,90	7,82	Ф – 12,30, 45,58 Т – 42,12 (ВИНН)
ВИНН+КНМ/1+/2	500	99,90	8,50	Ф – 39,65(ВИНН), 41,30(КНМ) Т – 19,05
КНМ+ВИНН+КНМ	520	99,71	8,82	Ф – 19,90(КНМ) 60,98(ВИНН) Т – 19,12(КНМ)
КНМ+Трикотаж+ КНМ/1+1+1	510	99,71	8,65	Ф – 36,67(КНМ) 21,32(Трикотаж) Т – 41,10(КНМ0)
КНМ+Трикотаж	500	99,98	8,49	Ф – 67,62(КНМ) Т – 32,38 (Трикотаж)

* Ф, Т – фронтальная и тыльная стороны электрода относительно токоподвода соответственно.

Представляется интересным изучение влияния различных профилей электрической проводимости и удельной реакционной поверхности углеродного волокнистого электрода на распределение металла по его толщине ПТЭ в зависимости от габаритной плотности тока и объёмной скорости протока раствора. Рассмотрение процесса в динамике, т.е. изменение показателей электролиза во времени, позволит расширить представление о закономерности электроосаждения металлов на проточные электроды

из УВМ и использовать полученные результаты для теоретических исследований и решения практических задач.

Электроосаждение меди проводили в гальваностатическом режиме из раствора состава (г/л): Cu – 0,16; H₂SO₄ – 25; (NH₄)₂SO₄ – 80 – по методике, описанной в монографии [3], на катоде электрохимической ячейки (рис. 1) с тыльным, относительно противозэлектрода, токоподводом и тыльной подачей раствора в электрод.

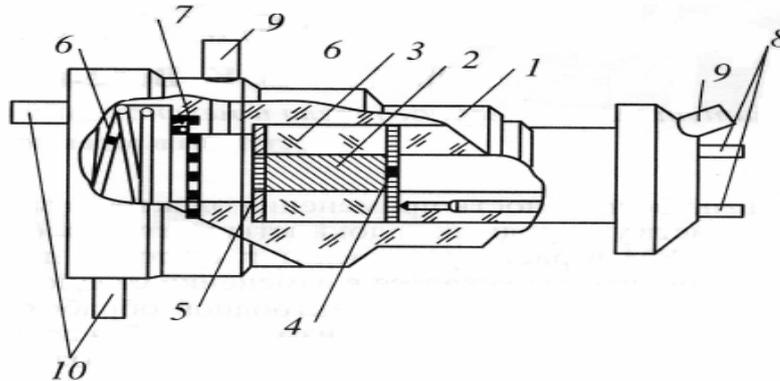


Рис. 1. Электрохимическая ячейка для изучения электрохимических процессов с электродами регулярной структуры (сотовой структуры)

Корпус ячейки 1 (см. рис. 1) изготовлен из оргстекла или фторопласта, исследуемый проточный электрод 2 фиксируется с помощью специального вкладыша 3, перфорированного токоподвода 4 и полихлорвиниловой (или полипропиленовой) сетки 5, анод 6 в виде спирали из платины может быть отделен от катодного пространства ионообменной мембраной 7, для подвода напряжения используются специальные токоподводы 8, подвод и отвод раствора в катодное и анодное пространства осуществлялся с помощью штуцеров соответственно 9 и 10. Свойства УВМ, использованных в составных электродах ПТЭ, приведены в табл. 2 [12, 13].

Т а б л и ц а 2

Марка материала	Удельная электрическая проводимость κ_T , См/см	Радиус волокна r , мкм	Удельная реакционная поверхность		Пористость ε	Плотность волокна, г/см ³
			отнесена к массе образца $S_{p m}$, см ² /г	отнесена к объёму образца $S_{p v}$, см ² /см ³		
КНМ	0,008	6,1	2100	200	0,94	1,5
АНМ	0,015	6,1	2500	210	0,94	1,5
НТМ-100	0,076	5,4	2400	250	0,93	1,6
ВИНН-250	0,101	4,5	3000	270	0,93	1,7
НТМ-200	0,2	4,5	3000	270	0,93	1,7
ВНГ-50	0,46	6,0	2200	265	0,92	1,8

Были рассмотрены катоды с различным профилем электрической проводимости: убывающий (1: ВНГ-50; НТМ-200; ВИНН250; АНМ; КНМ), возрастающий (2: КНМ; АНМ; НТМ-100; ВИНН-250-2; ВНГ-50), параболический (ветви вверх) (3: ВНГ-50; ВИНН-250; АНМ; ВИНН-250; ВНГ-50) и параболический (ветви вниз) (4: АНМ; ВИНН-250; ВНГ-50; ВИНН-250; АНМ). В табл. 3а и табл. 3б приведены проводимости по толщине ПТЭ – $\kappa_T(x)$, обусловленные таким выбором составов, распределения реакционной поверхности ПТЭ – $S_T(x)$ – и показатели равномерности распределения потенциала в каждом из рассмотренных случаев σ . При этом результаты, представленные в табл. 3а, получены для случая $i = 150 \text{ А/м}^2$; $m_V = 0,1 \text{ мл/(с·см}^2)$, а в табл. 3б, – когда $i = 250 \text{ А/м}^2$; $m_V = 0,1 \text{ мл/(с·см}^2)$.

Т а б л и ц а 3а

№	Профиль $\kappa_T(x)$, См/см	Профиль $S_T(x)$, см ² /см ³	σ
1	0,46+0,2+0,101+0,015+0,008	265+270+270+210+200 – обратная парабола	44
2	0,008+0,015+0,101+0,2+0,46	200+210+270+270+265 – обратная парабола	19
3	0,46+0,101+0,015+0,101+0,46	265+270+210+270+265 – «пила»	84
4	0,015+0,101+0,46+0,101+0,015	210+270+265+270+210 – «пила»	35

Т а б л и ц а 3б

№	Профиль $\kappa_T(x)$, См/см	Профиль $S_T(x)$, см ² /см ³	σ
5	0,46+0,2+0,101+0,015+0,008	265+270+270+210+200 – обратная парабола	44
6	0,008+0,015+0,101+0,2+0,46	200+210+270+270+265 – обратная парабола	18
7	0,46+0,101+0,015+0,101+0,46	265+270+210+270+265 – «пила»	71
8	0,015+0,101+0,46+0,101+0,015	210+270+265+270+210 – «пила»	97

Результаты экспериментальных исследований, представленные в табл. 3а, б, показывают существенную чувствительность показателей распределения процесса металлизации ПТЭ по толщине электрода. Лучшее с точки зрения равномерности распределения процесса обеспечивает вариант распределения исходной проводимости ПТЭ с номерами 2 и 6, когда $\kappa_T(x)$ представляет собой возрастающую кривую (от тыльной стороны электрода к фронтальной), а $S_T(x)$ – обратную парабола. Худшие варианты – варианты 3, 7, 8 – характеризуются, кроме прочего, тем, что распределение удельной реакционной поверхности в этих случаях несистемно – кривая представляет собой некоторую «пилу». Нужно отметить, что без дополнительных экспериментальных или теоретических исследований влияния функций $\kappa_T(x)$ и $S_T(x)$ сделать однозначное заключение о преимуществах того или иного распределения проводимости и реакционной поверхности проблематично.

Интересным представляется еще один вывод из анализа табл. 3, касающийся изменения свойств ПТЭ в процессе его металлизации: варианты 4 и 8 свидетельствуют о том, что величина габаритного тока может существенно влиять, в том числе, и на распределение процесса по толщине ПТЭ, что связано, видимо, с существенным «зарастанием» УВМ осаждающимся металлом и, как следствие, с изменением основных свойств ПТЭ. Такой же вывод можно сделать при анализе вариантов распределения процесса электроосаждения на ПТЭ, представленных на рис. 2.

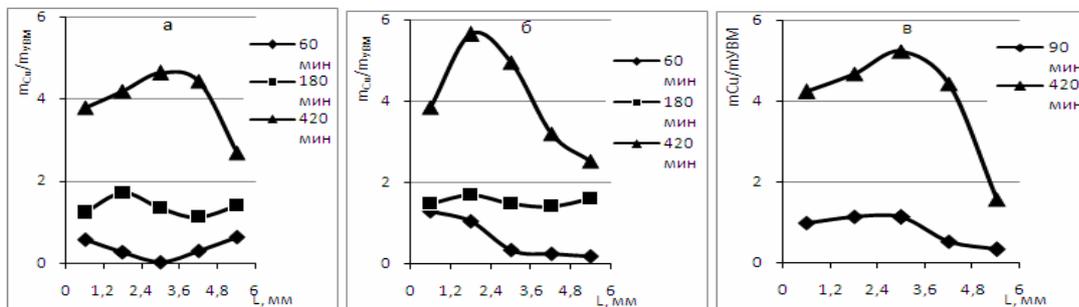


Рис. 2. Зависимость отношения массы меди к массе УВМ ($m_{Cu}/m_{УВМ}$) от толщины электрода (L , мм) для различного времени электролиза, i , А/м²: а – 500; б – 1500; в – 2500; $m_v = 0,1$ мл/(с·см²). УВЭ с «возрастающим» профилем электропроводности

В настоящее время существуют достаточно разработанные математические модели, методы вычислений и программные средства для теоретических исследований закономерностей распределения электрохимических процессов в ПТЭ, в том числе, и с учетом изменений основных параметров электрода, таких как $\kappa_T(x)$, $S_T(x)$, пористости, линейной скорости протока электролита и других [3–6]. Однако нужно отметить, что для проведения вычислительных экспериментов необходимо ознакомиться с серьезными математическими моделями, программными средствами и иметь в распоряжении ПЭВМ с достаточным программным обеспечением. В данной работе мы построим простейшую математическую модель, которую можно использовать для получения оценочных характеристик распределения потенциала по толщине ПТЭ для различных вариантов $\kappa_T(x)$, $S_T(x)$.

Простейшая математическая модель, описывающая распределение потенциала ПТЭ по его толщине $E(x)$, $0 \leq x \leq L$ при некоторых естественных упрощениях, использованных, например, в работе [14], может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E}{dx^2} &= BJ(x); \\ J(x) &= j_0 \left(e^{AE(x)} - e^{-CE(x)} \right); \\ \frac{dE}{dx}(0) &= -\frac{i}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{i}{\kappa_G}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $A = \frac{\alpha z F}{RT}$, $C = \frac{(1-\alpha) z F}{RT}$, $B = \left(\frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_G} \right) S_V$. Преобразовывая первое уравнение системы (1), можно получить выражение

$$\left(\frac{dE}{dx} \right) d \left(\frac{dE}{dx} \right) = B j_0 \left(e^{AE(x)} - e^{-CE(x)} \right) dE,$$

которое после интегрирования в пределах от $E(0)$ до $E(x^*)$, где x^* – точка минимума функции $E(x)$, приводит к соотношению

$$\frac{1}{\kappa_T^2} + 2Bj_0 \left[\frac{1}{A} \left(\frac{e^{AE(x^*)}}{i^2} - \frac{e^{AE(0)}}{i^2} \right) + \frac{1}{C} \left(\frac{e^{-CE(x^*)}}{i^2} - \frac{e^{-CE(0)}}{i^2} \right) \right] = 0.$$

При больших плотностях габаритного тока $E(x^*)$ много меньше, чем $E(0)$ и, следовательно, экспонентами, содержащими в качестве аргументов значение $E(x^*)$, можно пренебречь. Решение полученного упрощенного равенства относительно $E(0)$ позволяет записать приближенную формулу

$$E(0) \approx \frac{2}{A} \ln \left(\frac{Ai}{2\kappa_T^2 B j_0} \right). \quad (2)$$

Это выражение удобно использовать в качестве начального значения функции $E(x)$ при решении систем дифференциальных уравнений, представляющих собой полные математические модели процессов осаждения металлов в ПТЭ, приведенных в работах [15–18]. В этих работах и в работах других авторов отмечается, что распределение потенциала по толщине ПТЭ при сравнимых значениях электропроводностей твердой и жидкой фаз электрохимической системы с ПТЭ имеет U-образный характер, что наводит на мысль о возможности аппроксимации кривой распределения $E(x)$ параболической зависимостью

$$E(x) = A + Bx + Cx^2. \quad (3)$$

Из третьего и четвертого выражений системы (1), формулы (2) и выражения (3) нетрудно получить приближенную зависимость

$$E(x) \approx \frac{2}{A} \ln \left(\frac{Ai}{2\kappa_T^2(x) \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_G} \right) S_V(x) j_0} \right) + \left(\frac{-i}{\kappa_T(x)} \right) x + \frac{i}{\kappa_T(x)} + \frac{i}{\kappa_G} x^2. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет выполнить начальные оценки распределения потенциала ПТЭ в зависимости от распределенных значений $\kappa_T(x)$ и $S_V(x)$. Формула (4) легко программируется в любой вычислительной системе, например, в системе *MathCad*.

Результаты расчетов распределения потенциала по толщине ПТЭ по формуле (4) с использованием параметров процесса, означенных ранее, приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

№	Профиль $\kappa_T(x)$	Профиль $S_V(x)$	$\frac{\max E(x)}{\min E(x)}$
1	Убывающая кривая	Обратная парабола	2,52
2	Возрастающая кривая	Обратная парабола	1,44
3	Парабола (ветви вверх)	«Пила»	1,88
4	Парабола (ветви вниз)	«Пила»	3,54

Сравнение результатов расчетов (табл. 4) с результатами экспериментальных исследований (табл. 3) показывает достаточное соответствие влияния профилей удельной электропроводности и реакционной поверхности на равномерность распределения потенциала по толщине ПТЭ. Очевидно, что полного совпадения результатов приближенных расчетов и экспериментов ожидать не следует, так как в формуле (4) не учтено множество факторов, влияющих на распределение процесса в ПТЭ. Однако нам представляется, что формула (4) может быть использована для ориентировочных оценок при выборе режимов электрохимических процессов в ПТЭ.

Рассмотренные катоды, составленные из выбранных УВМ (см. табл. 1), характерны тем, что ПТЭ с такими катодами имеют как распределенную удельную проводимость, так и распределенную удельную реакционную поверхность. В то же время известно, что существуют возможности получить такие конструкции ПТЭ, у которых одна из функций, описывающих распределение соответствующих характеристик $\kappa_T(x)$ или $S_V(x)$, является постоянной величиной. Так, различные значения $S_V(x)$ при заданном $\kappa_T(x) = \text{const}$, можно получить путем сжатия/растяжения УВМ, а распределенные значения $\kappa_T(x)$ при заданной величине $S_V(x) = \text{const}$, можно получить посредством специальной электрохимической обработки выбранного УВМ.

В табл. 5 приведены результаты расчетов по уравнению (4) для модельных УВМ, характеризующихся либо постоянным значением $\kappa_T(x)$, либо постоянным значением $S_V(x)$. Знак \uparrow означает возрастание соответствующей функции; \downarrow – убывание; \cup – парабола, ветви вверх; \cap – парабола, ветви вниз.

Т а б л и ц а 5

№	профиль $\kappa_T(x)$, См/см	Вид	профиль $S_V(x)$, см ² /см ³	Вид	$\frac{\max E(x)}{\min E(x)}$
1	2	3	4	5	6
1	0,1+0,2+0,3+0,4+0,6	\uparrow	250		1,26
2	0,6+0,4+0,3+0,2+0,1	\downarrow	250		1,12
3	0,6+0,3+0,1+0,3+0,6	\cup	250		1,19
4	0,1+0,3+0,6+0,3+0,1	\cap	250		1,35
5	0,3		200+230+250+270+300	\uparrow	1,14

1	2	3	4	5	6
6	0,3		300+270+250+230+200	↓	1,19
7	0,3		300+250+200+250+300	∪	1,13
8	0,3		200+250+300+250+200	∩	1,21
9	0,1+0,2+0,3+0,4+0,6	↑	200+230+250+270+300	↑	1,29
10	0,6+0,4+0,3+0,2+0,1	↓	300+270+250+230+200	↓	1,16
11	0,6+0,4+0,3+0,2+0,1	↓	200+230+250+270+300	↑	1,08
12	0,1+0,2+0,3+0,4+0,6	↑	300+270+250+230+200	↓	1,24
13	0,6+0,4+0,3+0,4+0,6	∪	300+270+250+270+300	∪	1,20
14	0,6+0,4+0,3+0,4+0,6	∪	200+250+300+250+200	∩	1,18
15	0,3+0,4+0,6+0,4+0,3	∩	300+270+250+270+300	∪	1,22
16	0,1+0,3+0,6+0,3+0,1	∩	200+250+300+250+200	∩	1,44

Результаты расчетов показывают, что для линейных форм функций $\kappa_T(x)$ и $S_T(x)$ лучшим результатом с точки зрения равномерности распределения потенциала является вариант № 11 – убывающий профиль $\kappa_T(x)$ и возрастающий $S_T(x)$; для квадратичных форм – вариант № 14: парабола ветвями вверх для $\kappa_T(x)$ и парабола ветвями вниз для $S_T(x)$.

Результаты приведенных выше экспериментальных исследований и численные расчеты, а также наши ранее опубликованные данные [2, 15–18 и др.] показывают, что исходные профили электропроводности и удельной реакционной поверхности проточного трехмерного электрода из УВМ, в совокупности с технологическими условиями процесса, оказывают существенное влияние на показатели процесса электроосаждения металла (скорость осаждения, выход по току, равномерность распределения осадка по толщине электрода) на протяжении всего процесса – до зарастания электрода осадком металла. Очевидно, что при оценке технологических показателей и выборе оптимальных элементов конструкции ПТЭ и режимов осаждения для каждого конкретного электрохимического процесса необходимо учитывать все особенности процесса и электрода, цели и задачи процесса и осуществлять правильный выбор математических моделей для достаточно полного и адекватного описания электрохимического процесса в ПТЭ математическими уравнениями.

Список литературы

1. Koshev, A.N.. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Nanotechnologies in Construction*. – 2025. – 17(2). – P.119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.
2. Электроизвлечение благородных металлов из растворов переработки минерального и техногенного сырья на проточные трехмерные электроды из углеродных волокнистых материалов. Теоретические и экспериментальные исследования, промышленные испытания, освоение технологических процессов : моногр. / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова, А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – Пенза : ПГУАС, 2024. – 248 с. – ISBN 978-5-9282-1761-7.
3. Электролизеры и электрохимические процессы с проточными трехмерными углеродными электродами. Основы разработки, математическое моделирование, теоретические и экспериментальные исследования, промышленное освоение : монография / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза : ПГУАС, 2025. – 360 с. – ISBN 978-5-9282-1769-3.
4. Варенцов, В.К. Реакционная поверхность, как одна из важнейших характеристик композитов и нанокompозитов, создаваемых на основе металлизации углеродных волоконных материалов / В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев. – DOI:

10.54734/20722958_2025_2_92 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63) – С. 92–98.

5. Кузина, В.В. Изменение удельной реакционной поверхности углеродистого волокнистого электрода при гальванической металлизации / В.В. Кузина, А.Д. Рыжов, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов. – DOI: 10.54734/20722958_2025_3_73 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 3 (64). – С. 73–77.

6. Кошев, А.Н. Оптимизация процесса металлизации углеродных волокон при распределенной реакционной поверхности углеродистого волокнистого электрода / А.Н. Кошев, В.В. Кузина, О.М. Гвоздева, В.К. Варенцов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4 (65). – С. 35–37.

7. Сагитова, Ф.Р. Модификация углеродных волокон и тканей для их применения в качестве армирующих компонентов в композиционных материалах / Ф.Р. Сагитова, Ф.С. Шарифуллин. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81 // Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 8. – С. 81–86.

8. Grechushkina, D.E. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating / D.E. Grechushkina, V.A. Nelyub. – DOI: 10.3103/s0967091223020079 Steel in Translation. – 2023. – V. 53, № 2. – P. 134–137.

9. Варенцов, В.К. Локальное извлечение золота и серебра из растворов, используемых в производстве радиоэлектронных изделий / В.К. Варенцов, З.Т. Белякова // Гальванотехника и обработка поверхностей. – 1993. – Т. 2, № 4. – С. 73–80.

10. Варенцов, В.К. Электрохимические процессы и аппаратура с объёмно-пористыми проточными электродами для извлечения металлов из разбавленных растворов : дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.03 : защищена 14.02.90 : утв. 06.07.90 / Варенцов Валерий Константинович. – Свердловск, 1990. – 452 с.

11. Варенцов, В.К. Влияние технологических параметров на окисление цианид-роданид-ионов на оксидных анодах / В.К. Варенцов, З.Т. Белякова // Цветные металлы. – 1984. – № 2. – С. 95–97.

12. Варенцов, В.К. Металло-оксидные электроды на основе углеродных волокнистых материалов / В.К. Варенцов // Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии». Плес, Иванов. обл.: Ин-т химии растворов им. Г.А. Крестова РАН. – 2012. – С. 66.

13. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч.1. Трёхмерные проточные электроды / В.К. Варенцов. – Новосибирск : НГТУ, 2005. – 120 с.

14. Варенцов, В.К. Теоретические и экспериментальные исследования эффекта образования анодных зон в объеме катодно-поляризованного трехмерного электрода из углеродного волокнистого материала / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 4. – С. 464–473.

15. Кошев, А.Н. О влиянии газообразования в порах проточного объёмно-пористого катода на электропроводность электролита / А.Н. Кошев, Г.Н. Глейзер, В.К. Варенцов // Электрохимия. – 1992. – Т. 28, № 8. – С. 1160–1170.

16. Кошев, А.Н. Процессы в пористом электроде в случае распределенной скорости протока электролита / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, И.Ф. Сухов, И.Г. Гвоздева // Математическое моделирование. – 2013. – Т. 24, № 2. – С. 87–101.

17. Кошев, А.Н. Расчет оптимальной электропроводности проточных объёмно-пористых катодов / А.Н. Кошев, И.Г. Гвоздева, Н.А. Кошев, В.К. Варенцов // Управление большими системами. Электронный сборник трудов института проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова. – 2012. – № 37. – С. 232–249.

18. Кошев, А.Н. Расчет эффективного профиля электропроводности электрохимического реактора с проточными трехмерными электродами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, И.Ф. Сухов // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 2. – С. 195–202.

References

1. Koshev, A.N.. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and

nanocomposite materials / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Nanotechnologies in Construction*. – 2025. – 17(2). – P.119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.

2. Electrical extraction of precious metals from solutions of mineral and technogenic raw materials processing using flow-through three-dimensional electrodes made of carbon fibrous materials. Theoretical and experimental studies, industrial testing, development of technological processes : monograph / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova, A.N. Koshev, V.V. Kuzina. – Penza : PSUAC, 2024. – 248 p. – ISBN 978-5-9282-1761-7.

3. Electrolyzers and electrochemical processes with flow-through three-dimensional carbon electrodes. Development principles, mathematical modeling, theoretical and experimental studies, industrial development : monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza : PSUAC, 2025. – 360 p. – ISBN 978-5-9282-1769-3.

4. Varentsov, V.K. Reaction surface as one of the most important characteristics of composites and nanocomposites created based on metallization of carbon-graphite fibrous materials / V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev. – DOI: 10.54734/20722958_2025_2_92 // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – No. 2 (63) – P. 92–98.

5. Kuzina, V.V. Change in the specific reaction surface of a carbon-graphite fiber electrode during galvanic metallization / V.V. Kuzina, A.D. Ryzhov, A.N. Koshev, V.K. Varentsov. – DOI: 10.54734/20722958_2025_3_73 // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – No. 3 (64). – P. 73–77.

6. Koshev, A.N. Optimization of the metallization process of carbon fibers with a distributed reaction surface of a carbon-graphite fiber electrode / A.N. Koshev, V.V. Kuzina, O.M. Gvozdeva, V.K. Varentsov // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – No. 4 (65). – P. 35–37.

7. Sagitova, F.R. Modification of carbon fibers and fabrics for their use as reinforcing components in composite materials / F.R. Sagitova, F.S. Sharifullin. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81 // *Bulletin of the Technological University*. – 2025. – V. 28, No. 8. – P. 81–86.

8. Grechushkina, D.E. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating / D.E. Grechushkina, V.A. Nelyub. – DOI: 10.3103/s0967091223020079. *Steel in Translation*. – 2023. – V. 53, № 2. – P. 134–137.

9. Varentsov, V.K. Localized Extraction of Gold and Silver from Solutions Used in the Production of Electronic Products / V.K. Varentsov, Z.T. Belyakova // *Electroplating and Surface Treatment*. – 1993. – Vol. 2, No. 4. – P. 73–80.

10. Varentsov, V.K. Electrochemical Processes and Equipment with Volume-Porous Flow-Through Electrodes for Extracting Metals from Dilute Solutions : Doctor of Engineering Sciences Dissertation : 05.17.03 : Protected on February 14, 1990 : Approved on July 6, 1990 / Varentsov, Valery Konstantinovich. – Sverdlovsk, 1990. – 452 p.

11. Varentsov, V.K. Effect of Process Parameters on the Oxidation of Cyanide-Rhovanide Ions on Oxide Anodes / V.K. Varentsov, Z.T. Belyakova // *Non-Ferrous Metals*. – 1984. – No. 2. – P. 95–97.

12. Varentsov, V.K. Metal-Oxide Electrodes Based on Carbon Fibrous Materials / V.K. Varentsov // Abstract of the Report of the IV Int. Scientific and Technical Conf. «Modern Methods in Theoretical and Experimental Electrochemistry». Ples, Ivanovo Region: G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry, Russian Academy of Sciences. – 2012. – P. 66.

13. Varentsov, V.K. Modern Problems of Technical Electrochemistry. Part I. Three-Dimensional Flow Electrodes / V.K. Varentsov. – Novosibirsk : NSTU, 2005. – 120 p.

14. Varentsov, V.K. Theoretical and experimental studies of the effect of formation of anodic zones in the volume of a cathodically polarized three-dimensional electrode made of carbon fiber material / V.K. Varentsov, A.N. Koshev // *Theoretical Foundations of Chemical Technology*. – 2022. – V. 56, No. 4. – P. 464–473.

15. Koshev, A.N. On the influence of gas formation in the pores of a flow-through volume-porous cathode on the electrical conductivity of the electrolyte / A.N. Koshev, G.N. Glazer, V.K. Varentsov // *Electrochemistry*. – 1992. – V. 28, No. 8. – P. 1160–1170.

16. Koshev, A.N. Processes in a porous electrode in the case of a distributed electrolyte flow velocity / A.N. Koshev, V.K. Varentsov, I.F. Sukhov, I.G. Gvozdeva // *Mathematical modeling*. – 2013. – V. 24, No. 2. – P. 87–101.

17. Koshev, A.N. Calculation of the optimal electrical conductivity of flow-through volume-porous cathodes / A.N. Koshev, I.G. Gvozdeva, N.A. Koshev, V.K. Varentsov // *Control of Large Systems. Electronic Collection of Works of the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences named after V.A. Trapeznikov*. – 2012. – No. 37. – P. 232–249.

18. Koshev, A.N. Calculation of the Effective Conductivity Profile of an Electrochemical Reactor with Three-Dimensional Flow Electrodes / A.N. Koshev, V.K. Varentsov, I.F. Sukhov // *Theoretical Foundations of Chemical Technology*. – 2014. – V. 48, No. 2. – P. 195–202.

УДК 339. 691.5

DOI 10.54734/20722958_2026_1_27

*Российский экономический университет
им. В.Г. Плеханова*

Россия, 115054, г. Москва,
Стремянный переулок, д.36
тел.: (8495) 958-27-43

Зайцева Мария Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры международного бизнеса
E-mail: zajc@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

Куимова Елена Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: lena-kui@mail.ru

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

*Russian University of Economics
named after V.G. Plehanov*

Russia, 115054, Moscow, 36,
Stremyanny Lane,
tel.: (8495) 958-27-43

Zaytseva Maria Vladimirovna
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «International Business»
E-mail: zajc@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

Kuimova Elena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: lena-kui@mail.ru

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

ВЫБОР ПОСТАВЩИКА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ: МЕТОД ПОПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

М.В. Зайцева, Е.И. Куимова, В.И. Логанина

Приведены сведения о применении метода попарных сравнений при выборе поставщика строительной продукции. На примере штукатурных сухих строительных смесей рассмотрены следующие критерии: стоимость сухих строительных смесей, эмиссия CO₂ на 1 тонну производства, показатели качества. Рассмотрены штукатурные смеси на основе цемента, воздушной и гидравлической извести. Установлено, что при данных числовых значениях критериев предпочтение отдается цементным сухим строительным смесям.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, поставщик, методика попарных сравнений, стоимость, качество, эмиссия углерода

CHOOSING A SUPPLIER OF DRY BUILDING MIXES: THE METHOD OF PAIRWISE COMPARISONS

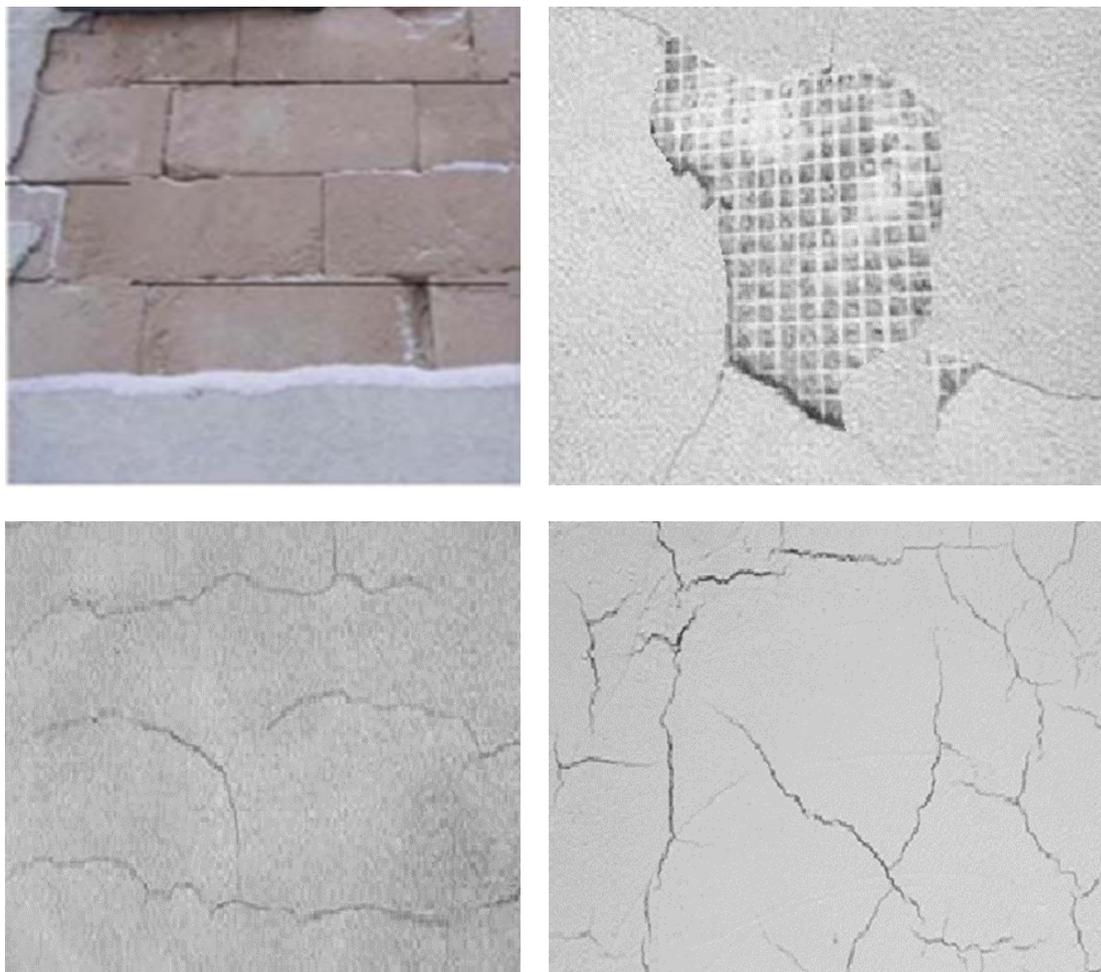
M.V. Zaytseva, E.I. Kuimova, V.I. Loganina

The article provides information on the application of pairwise comparisons method when choosing a supplier of construction products. Using the example of dry plaster building mixes, the following criteria are considered: the cost of DBM, CO₂ emissions per 1 ton of production, and quality indicators. Cement, lime, and hydraulic lime-based plaster mixtures are considered. It has been established that with these criteria numerical values cement DBM are preferred.

Keywords: dry building mixes, supplier, method of pairwise comparisons, cost, quality, carbon emissions

Для отделки стен зданий широкое применение находят декоративные штукатурные смеси [1, 2]. В процессе эксплуатации наружный отделочный слой подвергается увлажнению за счет действия дождей, высокой относительной влажности воздуха, а также за счет диффузии водяного пара через ограждающую конструкцию от внутрен-

ней поверхности к наружной в холодный период. Кроме того, в осенне-весенний период штукатурное покрытие подвергается попеременному замораживанию-оттаиванию, что в числе других факторов приводит к разрушению отделочного слоя, проявляющемуся в виде отслоений или сетки из мелких волосяных трещин. Были проведены обследования состояния оштукатуренной поверхности фасадов зданий в г. Пензе по ул. Циолковского, ул. Калинина, ул. Можайского. Данные штукатурные работы были выполнены с использованием штукатурок на цементной основе. Срок эксплуатации покрытий составлял 3 года. Установлено, что основные дефекты эксплуатации – это трещины в покрытии, а также отслаивание покрытия (см. рисунок).



Дефекты штукатурки на фасаде зданий

Актуальным является выбор того или иного вида штукатурного состава, покрытия на основе которого обладают стойкостью в процессе эксплуатации. В связи с этим при выборе поставщика качественных отделочных штукатурных составов следует основываться на их экономической и производственной эффективности.

Критерии оценки поставщика предприятий строительной отрасли формируются покупателем, что обусловлено стратегией предприятий и особенностями требований заинтересованных сторон [3, 4]. При этом можно выделить международно признанные модели, содержащие набор критериев для оценки поставщика и продукта. В табл. 1 представлены следующие модели оценки поставщиков и продуктов: модель десяти параметров Рея Картера; модель, описанная Лайсонсом и Фаррингтоном; модель, представленная Монжской и группой авторов [5-7]. Среди объединяющих данные модели критериев можно выделить стоимость, качество, устойчивое развитие [8-11].

Модели оценки поставщиков и продуктов

1. Модель Рея Картера (10 критериев)	1. Модель Лайсона и Фаррингтона (10 критериев)	1. Модель Монжски (14 критериев)
Компетенции	Финансовая устойчивость	Стоимость или цена
Производительность	Страхование	Качество и доставка
Постоянство и последовательность	Мощность и производительность	Управляемость процессами
Управление процессами	Качество	Общий уровень качества
Финансовая устойчивость	Безопасность труда	Структура стоимости
Коммуникации	Управление влиянием на окружающую среду	Обеспеченность персоналом
Стоимость	Исполнение текущих контрактных обязательств	Философия компании
Качество	Организационная структура и ключевые заинтересованные стороны	Процессы и техническая обеспеченность
Корпоративная социальная ответственность	Субконтрактинг и управление закупками	Соответствие требованиям устойчивого развития
Культура	Управление цепями поставок	Финансовая стабильность
		Планирование производства
		Системы контроля
		Глубина цифровизации коммерческих операций
		Закупочные стратегии

Рассмотрим в качестве примера выбор поставщика сухих строительных смесей (ССС), предназначенных для реставрации и отделки стен зданий. Выбор осуществлялся из трех вариантов сухих строительных смесей: на основе цементного, на основе известкового вяжущего и на основе гидравлической извести [12-14]. В качестве критерия приняты технические характеристики продуктов, стоимостные составляющие продуктов и экологические аспекты. Свойства ССС приведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Свойства сухих строительных смесей

Значения показателей ССС	Цементная	Известковая	На основе гидравлической извести
Плотность, кг/м ³	1700	900	700
Прочность при сжатии, МПа	5,1	3,5	4,7
Прочность сцепления, МПа	0,6	1,2	0,4
Марка морозостойкости	F35	F35	F35

Стоимость определялась путем моделирования затрат на материалы, исходя из рецептуры продукта (табл. 3).

Целевая стоимость сухой строительной смеси и эмиссия CO₂

Сухая строительная смесь	Целевая стоимость, руб./кг	Эмиссия CO ₂ , т, при производстве 1 тонны вяжущего
На основе воздушной извести (ВИ)	19,41	0,86
На основе гидравлической извести (ГИ)	19,82	0,59
На основе цемента (ЦВ)	12,42	0,4985

Используя метод попарных сравнений, определяли приоритетные варианты источников поставок ССС. Для повышения степени объективности и качества процедуры принятия рационального выбора учитывалось мнение нескольких экспертов. С этой целью проводилась групповая экспертиза, причем технологические, стоимостные и экологические аспекты в оценке весомости критериев и альтернатив определялись специалистами разного профиля.

При выполнении попарных сравнений необходимо было ответить на следующие вопросы: какая из двух сравниваемых альтернатив предпочтительнее или имеет большее преимущество? Для получения каждой матрицы попарного сравнения a_{ij} по каждому критерию эксперт выносил $n(n-1)/2$ суждений (здесь n – порядок матрицы попарных сравнений).

Шкала, позволяющая эксперту ставить некоторые числа в соответствие степеням предпочтения одного сравниваемого объекта перед другим, была выбрана следующая:

- 1 – одинаковая значимость (два действия вносят одинаковый вклад в достижение);
- 3 – слабая значимость (существуют соображения в пользу предпочтения одной из альтернатив);
- 5 – существенная значимость (имеются надежные данные или логические суждения для того, чтобы считать предпочтительнее одну из альтернатив).

Матрица попарных сравнений обладает свойством обратной симметрии, т. е.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}. \quad (1)$$

Матрица попарных сравнений критериев качества, стоимости и эмиссии CO₂ приведена в табл. 4, 5.

Т а б л и ц а 4

Матрица попарных сравнений показателей качества

Критерий	Плотность			Прочность при сжатии			Прочность сцепления		
	ГИ	ВИ	ЦВ	ГИ	ВИ	ЦВ	ГИ	ВИ	ЦВ
ГИ	1	3	5	1	3	1/3	1	1/5	1/3
ВИ	1/3	1	3	1/3	1	1/5	5	1	3
ЦВ	1/5	1/3	1	3	5	1	3	1/3	1

Т а б л и ц а 5

Матрица попарных сравнений показателей стоимости и эмиссии CO₂

Критерий	Стоимость			Эмиссия CO ₂		
	ГИ	ВИ	ЦВ	ГИ	ВИ	ЦВ
ГИ	1	1/3	1/3	1	3	1/3
ВИ	3	1	1/5	1/3	1	1/5
ЦВ	3	5	1	3	5	1

После оценки математических ожиданий величин a_{ij} получим матрицу

$$X_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1,91 & 1,27 \\ 1,8 & 1 & 1,32 \\ 2,44 & 3,13 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

на основе которой можно определить коэффициенты относительной важности изучаемых альтернатив. Ранжирование элементов, анализируемых с использованием матрицы попарных сравнений, осуществлялось на основе главных собственных векторов, получаемых в результате обработки матриц.

Вычисление главного собственного вектора W положительной квадратной матрицы X проводилось согласно равенству

$$Xk = \lambda_{\max} k, \quad (3)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы X .

Для положительной квадратной матрицы X правый собственный вектор k , соответствующий максимальному собственному значению λ_{\max} , с точностью до постоянного множителя C можно вычислить по асимптотической формуле

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{X^k k_0}{k_0^T X^k k_0} = Ck, \quad (4)$$

где $k_0 = (1, 1, 1)^T$.

Воспользуемся итерационным алгоритмом вида, на каждом этапе которого (t – номер итерации) работают рекуррентные соотношения

$$k^t = \frac{1}{\lambda^t} \cdot X \cdot k^{t-1}, \quad k_0 \cdot X \cdot k^{t-1}, \quad (5)$$

где X – матрица математических ожиданий оценок пар объектов; k^t – вектор коэффициентов относительной важности альтернатив на t -й итерации.

Также должно выполняться условие нормировки $\sum_{i=1}^n k_i^t = 1$. Алгоритм останавливают, как только $|k^t - k^{t-1}|$ окажется меньше заданной точности, на практике достаточно 0,01.

Были проведены 4 итерации, условие выхода исполнилось, получили следующие коэффициенты относительной важности:

ГИ	0,288327
ИВ	0,285999
ЦВ	0,425674

Таким образом, при данных условиях (показатели качества, стоимости, эмиссии CO₂) предпочтение отдается цементным ССС.

Предлагаемый метод выбора поставщика, на наш взгляд, позволяет объективно оценить поставщика и обеспечить бесперебойность поставок качественных продуктов на основе их экономической и производственной эффективности, что в конечном счете способствует повышению стойкости штукатурного отделочного слоя.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. – 2011. – №12. – С.62–65.

2. Логанина, В.И. Оптимизация составов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – №2. – С.53–57.
3. Зайцева, М.В. Оценка рисков потерь качества при управлении закупками / М.В. Зайцева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2023. – Т. 3, № 10(139). – С. 73–79.
4. Зайцева, М.В. Роль функции закупок в реализации стратегии устойчивого развития предприятия / М.В. Зайцева // Госзаказ: управление, размещение, обеспечение. – 2021. – № 66. – С. 110–117.
5. Carter, R. Practical Procurement / R. Carter. – Second edition. – Liverpool Academic Press, UK, 2014. – P. 28–36.
6. Dickson, G.W. An analysis of vendor selection: systems and decisions / G.W. Dickson // Journal of Purchasing. – 1966. – Vol. 2, Issue 1. – P.5–17.
7. Lysons, K. Procurement and supply chain management / K. Lysons, B. Farrington. – 8th edition. – Pearson Education, 2012. – P. 366–380.
8. Картер, Р. Исследование при оценке поставщиков параметра «качество» в рамках модели Картера / Р. Картер, М. Зайцева // Госзаказ: управление, размещение, обеспечение. – 2021. – № 62. – С. 116–133.
9. Monczka, R.M. Purchasing and Supply Chain Management / R.M. Monczka, R.V. Handfield, L.C. Giunipero and J.L. Pattersson. – Mason : South-West Cengege Learning, 2009. – P. 128–145.
10. Зайцева, М. Роль функции закупок в реализация стратегии устойчивого развития предприятия / М. Зайцева // Госзаказ. – 2021. – № 66.
11. Логанина, В.И. Отбор поставщиков как фактор повышения экономической эффективности предприятия / В.И. Логанина, М.В. Зайцева // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. – 2025.– №2.– С.51–56.
12. Логанина, В.И. Известковые составы с добавкой полисиликатного раствора для реставрации стен зданий / В.И. Логанина, М.В. Зайцева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2022. – N 5. – С. 45–48.
13. Логанина, В.И. Штукатурные растворы на гидравлической извести / В.И. Логанина, В.А. Езерский //Региональная архитектура и строительство. – 2025. – №2.– С.85–91.
14. Lesovik, V.S. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes / V.S. Lesovik, L.K. Zagorodnyuk, A.L. Kudinova, D.A. Sumskoj, A.E. Mestnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 5. – P. 12383–12390.

References

1. Loganina, V.I. Study of the regularities of the influence of silicic acid sol on the structure and properties of diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Construction materials. – 2011. – No. 12. – P. 62–65.
2. Loganina, V.I. Optimization of general-purpose compositions modified with nanosized additives / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, O.A. Davydova // Regional architecture and construction. – 2010. – No. 2. – P. 53–57.
3. Zaytseva, M.V. Assessment of the risks of quality loss in procurement management / M.V. Zaitseva // Economics and management: problems, solutions. – 2023. – Vol. 3, No. 10(139). – P. 73–79.
4. Zaytseva, M.V. The role of the procurement function in the implementation of the sustainable development strategy of the enterprise / M.V. Zaitseva // State order: management, placement, provision. – 2021. – No. 66. – P. 110–117.
5. Carter, R. Practical Procurement / R. Carter. – Second edition. – Liverpool Academic Press, UK, 2014. – P. 28–36.

6. Dickson, G.W. An analysis of vendor selection: systems and decisions / G.W. Dickson // *Journal of Purchasing*. – 1966. – Vol. 2, Issue 1. – P.5–17.
7. Lysons, K. Procurement and supply chain management / K. Lysons, B. Farrington. – 8th edition. – Pearson Education, 2012. – P. 366–380.
8. Carter, R., Zaitseva, M. Research in evaluating suppliers of the «quality» parameter within the framework of the Carter model / R. Carter, M. Zaitseva // *State order: management, placement, provision*. – 2021. – No. 62. – P. 116–133.
9. Monczka, R.M. Purchasing and Supply Chain Management / R.M. Monczka, R.B. Handfield, L.C. Giunipero and J.L. Pattersson. – Mason : South-West Cengege Learning, 2009. – P. 128–145,.
10. Zaitseva, M. The role of the procurement function in the implementation of the strategy of sustainable development of the enterprise // *Goszakaz*. – 2021. – No. 66.
11. Loganina, V.I. Selection of suppliers as a factor in increasing the economic efficiency of an enterprise / V.I. Loganina, M.V. Zaitseva // *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. – 2025. – No. 2. – P.51–56.
12. Loganina, V.I. Lime compositions with the addition of polysilicate mortar for the restoration of building walls / V.I. Loganina, M.V. Zaitseva // *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. – 2022. – N 5. – P. 45–48.
13. Loganina, V.I. Plaster mortars on hydraulic lime / V.I. Loganina, V.A. Ezersky // *Regional architecture and construction*. – 2025. – No. 2. – P. 85–91.
14. Lesovik, V.S. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes / V.S. Lesovik, L.K. Zagorodnyuk, A.L. Kudinova, D.A. Sumskoi, A.E. Mestnikov // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10, № 5. – P. 12383–12390.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4,
тел.: +7 (812) 316-53-11

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник кафедры
«Технология строительных материалов
и метрология»
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.,
tel.: +7 (812) 316-53-11

Grishina Anna Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
«Technology of Construction Materials
and Metrology»
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка технологии биощидной добавки, позволяющей повысить биобезопасность в промышленных и гражданских зданиях и сооружениях» (FSEM-2024-0001).

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Н. Гришина

Представлены требования к радиационно-защитным материалам с учетом специфики их эксплуатации и воздействия дополнительного фактора – биодеструкции. Предложена концепция создания специальных композиционных материалов, позволяющая обеспечить и сохранить защитные свойства материала путем управления его структурообразованием. Предложены технологии синтеза добавок, обеспечивающих управление структурообразованием на различных масштабных уровнях.

Ключевые слова: материалы специального назначения, концепция управления структурообразованием, радиационно-защитные свойства, фунгицидные агенты, нано- и микроразмерные гидросиликаты металлов

SCIENTIFIC BASIS FOR PRODUCING SPECIAL-PURPOSE COMPOSITE MATERIALS

A.N. Grishina

The article presents the requirements for radiation-protective materials, taking into account the specifics of their operation and the effects of additional factor – biodegradation. The concept of creating special composite materials is proposed, which makes it possible to ensure and preserve the protective properties of the material by controlling its structure formation. Techniques for the synthesis of additives providing structure formation control at various scale levels are proposed.

Keywords: special purpose materials, the concept of structure formation, radiation-protective properties, fungicidal agents, nano- and micro-sized hydrosilicates of metals

Введение. Современный подход к созданию строительных материалов предполагает изготовление композитов нового поколения, которые не только характеризуются повышенными показателями эксплуатационных свойств, но и имеют более широкие области применения [1-2]. К таким материалам, в частности, относятся радиационно-защитные композиты, используемые в медицинских учреждениях, фармацевтических предприятиях и предприятиях электронной промышленности и обеспечивающие кроме защиты от ионизирующего излучения микробиологическую безопасность. Известно, что споры плесневых грибов и микотоксины являются опасными для людей с низким иммунитетом (СанПиН 2.1.3.1375-03 «Гигиенические требования к размещению, устройству, оборудованию и эксплуатации больниц, родильных домов и других лечебных стационаров»); их присутствие не допускается в помещениях,

предназначенных для стерилизации медицинских инструментов (ГОСТ Р 59293-2021 «Чистота воздуха в производстве медицинских изделий»); они ухудшают работу электронного оборудования (ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц»). Кроме того, продукты жизнедеятельности плесневых грибов способствуют разрушению строительных материалов, снижая их эксплуатационные свойства.

При штатной работе аппаратов, генерирующих рентгеновское излучение, радиационный фон в помещениях увеличивается незначительно. Однако при сбоях в работе таких установок защитные материалы должны обеспечить радиационную безопасность. Очевидно, что такие сбои относятся к редким событиям, а воздействие биологического фактора, способствующего снижению защитных свойств материалов, явление постоянное. Цель проведенных исследований – разработка способа сохранения радиационно-защитных свойств материала в течение срока эксплуатации защитной конструкции путём предотвращения его биокоррозии.

Концепция управления структурообразованием вяжущих специального назначения. В настоящее время для создания строительных материалов широко применяется системный подход, согласно которому проводится обоснование выбора компонентов для изготовления материала [3-4]. При производстве радиационно-защитных материалов большее внимание уделяется виду и количеству используемых дисперсных фаз (заполнителей), так как они занимают до 80 % объёма композита. Однако матричный материал (искусственный камень) обеспечивает целостность (связность¹) композита, а также определяет его сопротивление деструкции, вызванной различными эксплуатационными факторами. Кроме того, матричный материал также может дополнительно повысить радиационно-защитные свойства композита. Таким образом, к вяжущим материалам, применяемым для изготовления защитных конструкций, кроме общестроительных должны предъявляться дополнительные требования (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Дополнительные требования (свойства), предъявляемые к вяжущим веществам, предназначенным для изготовления радиационно-защитных материалов

№ п/п	Структурные	№ п/п	Эксплуатационные
1	Минимальная пористость $P_{\text{общ}} = \min$; $P_{\text{закр}} = 0$; $P_{\text{кап}} = \min$ (здесь $P_{\text{общ}}$ – общая пористость; $P_{\text{закр}}$ – закрытая пористость; $P_{\text{кап}}$ – капиллярная пористость)	1	Высокое значение коэффициента ослабления гамма-излучения
2	Аморфная или аморфно-кристаллическая структура искусственного камня	2	Высокое значение коэффициентов выведения быстрых / тепловых нейтронов
3	Равномерное объёмное распределение эффективных химических элементов	3	Высокая радиационная стойкость
4	Минимальное радиационно-термическое расширение	4	Высокая биостойкость
		5	Фунгицидность

Обеспечить выполнение указанных требований можно на основании выбора элементного состава материала защиты, химического и фазового состава компонентов, используемых для создания радиационно-защитного материала (рис. 1).

¹ Свойство физических тел связывать частицы (Ефремова Т.Ф. Новый толково-словообразовательный словарь русского языка).



Рис. 1. Концепция управления структурообразованием вяжущих специального назначения

Системно-структурный подход предопределяет необходимость проведения оптимизации композиционных материалов на всех структурных уровнях, на которых происходит управление структурообразованием материала или формирование его функциональных свойств [2, 5, 6]. Естественно полагать, что структурные уровни, определяющие параметры и скорость формирования структуры материала, влияют также на его эксплуатационные свойства. Общепринято, что таким структурным уровнем композиционного материала является матричный материал. Наиболее массово матричный материал представлен искусственным камнем, полученным из минерального вяжущего вещества с различным сочетанием минеральных и химических добавок.

Обеспечение качества радиационно-защитного материала, обладающего фунгицидными свойствами, на структурном уровне матричного материала достигается последовательным решением следующих задач:

- 1) Определение элементного состава (вида и количества химических элементов).
- 2) Определение химического состава с учётом ограничений: по минимальному отклонению от элементного состава, по однородности объёмного распределения; по типу структуры и стойкости к воздействию химических сред и физических воздействий.

- 3) Минимизация пористости, возникающей как при изготовлении, так и при структурообразовании матричного материала.

Первая задача может быть решена с помощью доступной научно-технической информации и метода многокритериальной оптимизации. Вторая задача требует привлечения не только справочной информации, но и методов теории протекания (перколяции), а также сведений о плотности упаковки различных частиц и их смесей. Третья задача, как правило, имеет только эмпирические решения, получаемые с использованием обширного арсенала материаловедческих и технологических приёмов строительного материаловедения.

В данной статье представлены результаты решения первой задачи и инструмент для решения второй задачи при изготовлении искусственного камня из композиционного вяжущего на основе портландцемента.

Химические элементы, пригодные для разработки радиационно-защитных материалов, должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) Обладать максимальным коэффициентом ослабления гамма-излучения.
- 2) Обладать минимальной длиной релаксации нейтронного излучения определённого спектра.

- 3) Быть доступными.

Анализ научно-технической информации и классификация химических элементов, проведённая с привлечением обобщённого критерия, включающего указанные требования, показали, что для получения радиационно-защитных материалов, эксплуатирующихся в условиях воздействия гамма-излучения (диапазон энергий 0,1 ... 5,0 МэВ), тепловых и быстрых нейтронов, целесообразно применять 19 химических элементов – H, B, C, N, O, Na, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Ba, Pb.

Содержание каждого химического элемента варьируется в широком диапазоне, в зависимости от условий эксплуатации. Однако на перечень химических элементов и их содержание накладываются ограничения, связанные как с видом химических соединений, которые могут быть использованы для изготовления материала (включая влияние на коррозионные процессы), так и с однородностью распределения по объёму материала.

На основе справочных данных и опыта разработки радиационно-защитных композиционных материалов проводятся выбор и классификация химических соединений, содержащих соответствующие химические элементы, на две группы: 1) соединения, формирующие дисперсные фазы материала (как правило, эти соединения состоят из химических элементов с максимальным содержанием); 2) соединения, входящие в состав матричного материала. Выбор химических соединений, входящих в состав дисперсных фаз (заполнителей) и матричного материала, проводится в том числе с учётом требований табл. 1.

Обеспечение фунгицидности и сопряжённой с ней биостойкости в перечне 19 химических элементов осуществляется за счет фунгицидных агентов, содержащих барий, цинк, медь, серу, бор и кислород (табл. 2).

Искусственный камень испытывает максимальное негативное воздействие эксплуатационных факторов. Это предопределяет целесообразность размещения и равномерное распределение фунгицидных агентов в объёме матричного материала из композиционного вяжущего на основе портландцемента.

Т а б л и ц а 2

Фунгицидные агенты, содержащие эффективные химические элементы [7-12]

Фунгицидный агент	Модифицирующие добавки	Структура добавок, особенности применения в цементных системах	Возможность использования при создании композиционного вяжущего
Cu^{+2}	Соли, гидроксиды, оксиды металлов	Кристаллическая для оксидов, кристаллическая или аморфная для гидроксидов и солей в зависимости от аниона соли	Да
Zn^{+2}			
Ba^{+2}			
S^{-2} , $\text{S}_5\text{O}_6^{-2}$	Сульфиды, пентатионаты металлов	Кристаллическая, водорастворимы, могут содержать катионы щелочных металлов, пентатионаты, являются дорогостоящими веществами	Нет
O^0	Продукт распада пероксидов, гипохлоритов и др.	Исходные вещества нестабильны	Нет
	Продукт фотокатализа	Кристаллическая (TiO_2 , $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$), требуется источник света	Да
$\text{B}_2\text{O}_4^{-2}$	Бораты бария, натрия	Кристаллическая	Да, кроме солей, содержащих щелочные металлы

Для создания композиционного вяжущего специального назначения преимущественно используются вещества, имеющие аморфную структуру [13]. Такими веществами являются аморфные гидросиликаты бария, меди и цинка, кроме того, эти модификаторы могут проявлять пуццолановую активность.

Результаты синтеза наночастиц гидросиликатов металлов и обсуждение результатов. Для получения композиционного вяжущего можно применять природные гидросиликаты меди и цинка. Однако среди них известны кристаллические вещества, и их химический состав не постоянен. Эти ограничения преодолеваются синтезом нано- и микроразмерных гидросиликатов не только цинка и меди, но и бария. Такие гидросиликаты обладают стабильным химическим составом и регулируемые геометрическими характеристиками частиц.

Важно отметить, что, согласно ГОСТ 30515 – 2013, вводимые добавки можно классифицировать как минеральные, пуццолановые, при совместном введении композиционные и специальные. Содержание функциональных добавок в общестроительных цементах, согласно ГОСТ 31108 – 2020, не должно превышать 1,0 % от массы цемента. Однако этот ГОСТ не распространяется на цементы, к которым предъявляются специальные требования. Отсюда композиционное вяжущее, в составе которого количество гидросиликатов бария, цинка и/или меди будет превышать 1,0 % от массы цемента, следует отнести к специальным цементам.

Синтез наноразмерных гидросиликатов указанных металлов осуществлялся по технологии разбавленных растворов из прекурсора – кремниевой кислоты, полученной в среде, содержащей наночастицы гидроксида железа и низкоконцентрированных растворов соединений бария, цинка или меди. Для синтеза прекурсора – кремниевой кислоты – в кислый золь гидроксида железа различных концентраций вводился раствор гидроксида натрия (жидкое стекло) в различных количествах. Соотношение компонентов регулировалось величиной α :

$$\alpha = [\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-],$$

где $[\text{Na}^+]$ – концентрация катионов натрия в жидком стекле; $[\text{Cl}^-]$ – концентрация хлорид-анионов в кислом золе гидроксида железа.

По результатам проведённых исследований было установлено, что начальный размер синтезируемых наночастиц гидросиликатов металлов практически не зависит от концентрации используемого раствора (рис. 2), но зависит от вида аниона (рис. 3).

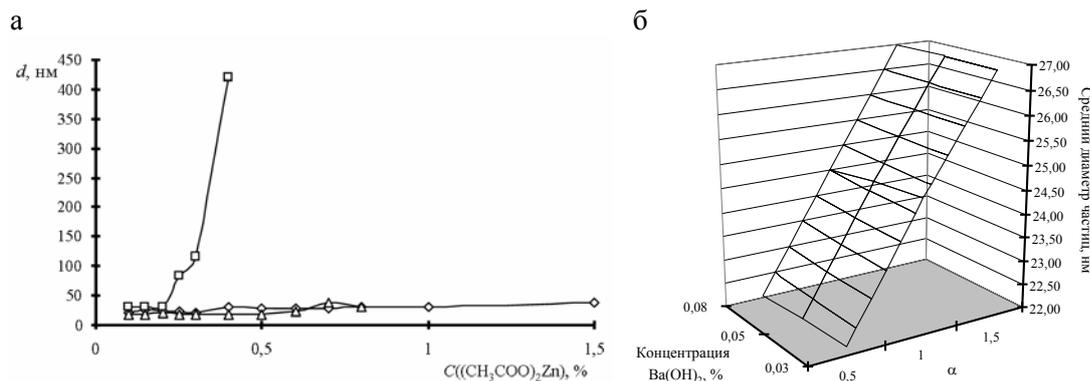


Рис. 2. Размеры наночастиц гидросиликатов металлов:

а – в зависимости от концентрации используемого раствора ацетата цинка:

◇ – $\alpha = 0,5$; △ – $\alpha = 1,0$; □ – $\alpha = 1,5$;

б – в зависимости от концентрации используемого раствора гидроксида бария при $C(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 0,7\%$

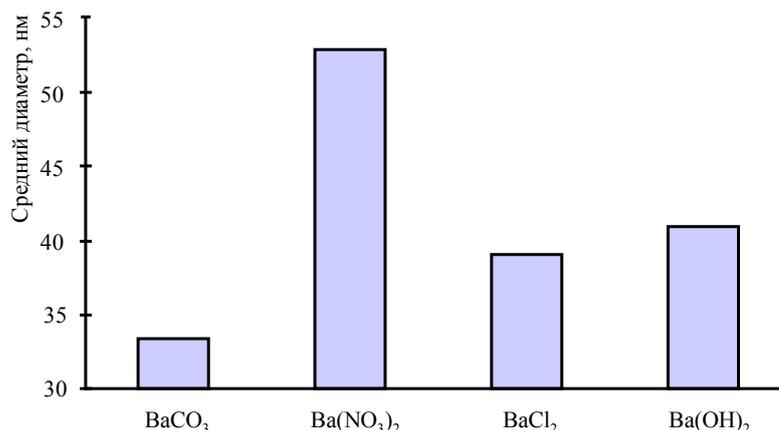


Рис. 3. Зависимость среднего диаметра частиц гидросиликатов бария от вида раствора соединений бария (при 25 °С) после синтеза

Результаты исследования седиментационной устойчивости показали, что наблюдаются два типа кинетики агрегирования частиц. Коллоидные растворы проявляют агрегативную устойчивость при $\text{pH} > 9$ и агрегативно неустойчивы при $\text{pH} < 9$. По показателям агрегативной устойчивости и размера синтезируемых частиц для получения наноразмерных гидросиликатов бария целесообразно использовать гидроксид бария. Для синтеза гидросиликатов цинка применялся ацетат цинка. Гидросиликаты меди, получаемые с использованием раствора хлорида меди концентрацией 0,5 %, являются седиментационно неустойчивыми. Возможно образование устойчивых растворов при снижении концентрации хлорида меди до 0,05 %, однако целесообразность получения таких растворов вызывает сомнения. В результате синтеза были получены коллоидные растворы следующего состава $\text{BaO} \cdot 5,56 \dots 36,12 \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и $\text{ZnO} \cdot 2,35 \dots 16,46 \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Анализ элементного состава: гидросиликатов металлов показывает, что фактическая брутто-формула близка к теоретической (рис. 4). Знания о брутто-формуле позволяет оценить концентрацию силикатной фазы в модификаторе. Концентрация растворов гидросиликатов цинка составляет 0,028...0,144 %, а гидросиликатов бария – 0,059...0,175 %.

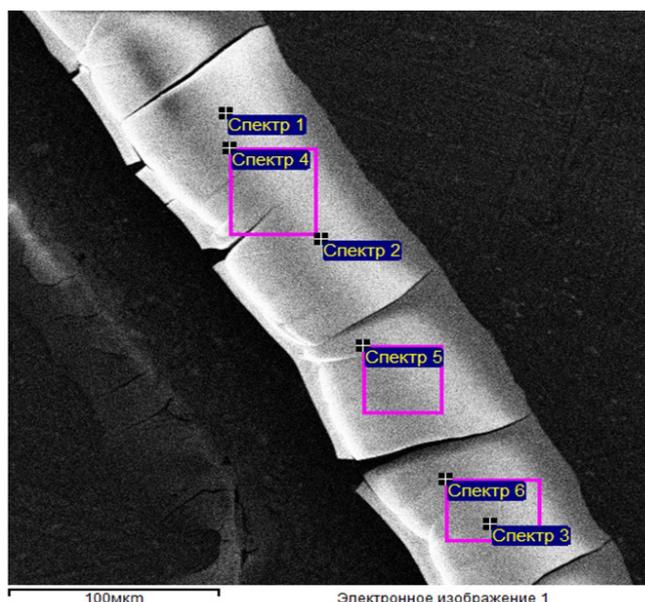


Рис. 4. Электронная микрофотография конденсированных гидросиликатов цинка. Брутто-формула по данным количественного элементного анализа $\text{ZnO} \cdot 4,72 \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, теоретическая брутто-формула – $\text{ZnO} \cdot 4,70 \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Для использования наноразмерных гидросиликатов металлов в качестве модификаторов цементных систем важно обеспечить их активность по отношению к портландиту для увеличения количества гидросиликатов кальция. Поэтому атом водорода не во всех силанольных группах должен быть замещён на атом металла. Исследования структуры наноразмерных гидросиликатов бария показали наличие силанольной группы в гидросиликатах металлов (валентные колебания Si–OH-связи наблюдаются при 1100-1150 см^{-1} , а деформационные колебания – при 950-960 см^{-1}) [14]. Данный фактор свидетельствует о гидрофильности материала, подтверждает аморфную структуру и способность к химической сорбции, что позволяет наномодификатору связывать ионы кальция, образующиеся при гидратации цемента (рис. 5). Связывание иона бария кремниевой кислотой подтверждается данными КР-спектроскопии – образованием связи Ba–O (рис. 6).

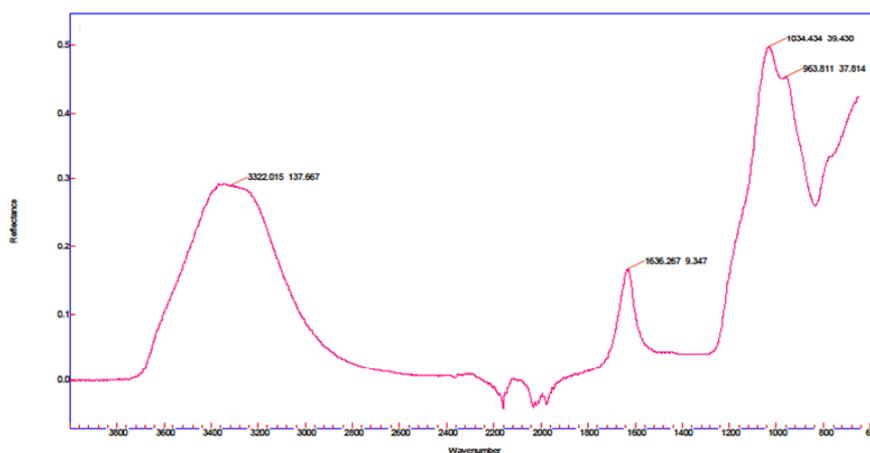


Рис. 5. ИК-спектр гидросиликатов бария, полученных с применением золя кремниевой кислоты с $\text{C}(\text{SiO}_2) = 0,7\%$ и раствора гидроксида бария с $\text{C}(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 0,04\%$

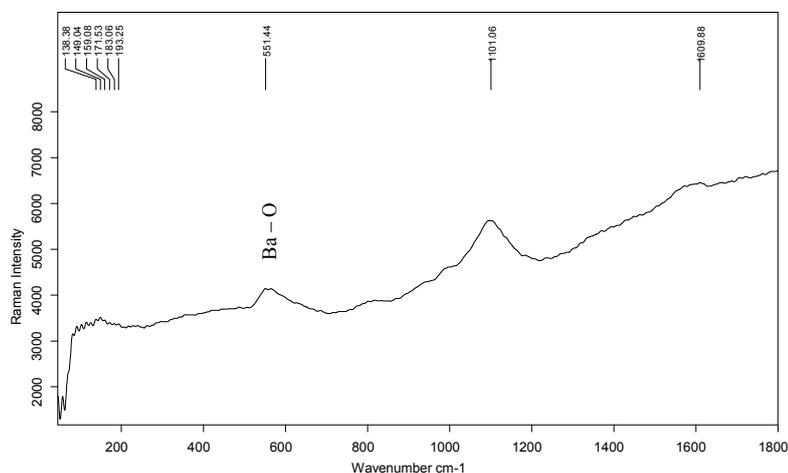


Рис. 6. КР-спектрограмма наноразмерных гидросиликатов бария

Результаты синтеза микрочастиц гидросиликатов металлов и обсуждение результатов. Синтез микроразмерных гидросиликатов бария, цинка и меди осуществлялся путём осаждения растворов гидросиликатов натрия растворами солей бария, цинка и меди (сульфатов или хлоридов). Продукты осаждения тщательно промывались до отсутствия в промывных водах сульфат- или хлорид-анионов. Средний размер частиц гидросиликатов бария, меди и цинка составил 5-7 мкм.

В научно-технической литературе имеется информация, что применение солей амфотерных металлов может приводить к синтезу не гидросиликатов меди или цинка, а гидроксида, карбоната и гидроксикарбоната меди или же различных гидроксидов

цинка γ -Zn(OH)₂; δ -Zn(OH)₂·0,5H₂O. Поэтому для установления кристаллических фаз в составе продуктов осаждения были проведены рентгенофазовые исследования (рис. 7-9).

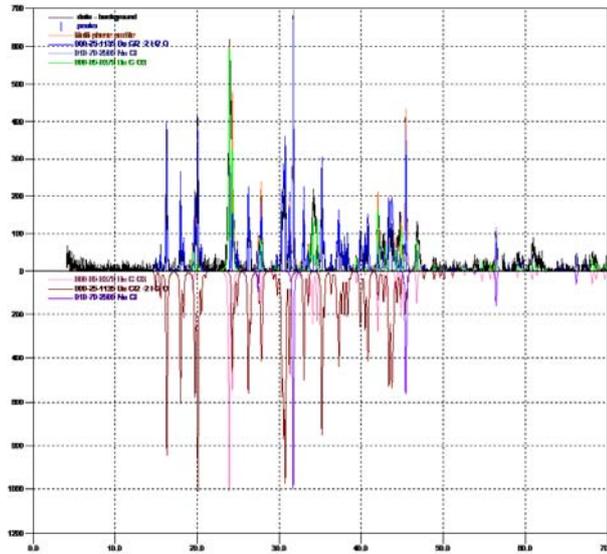


Рис. 7. Рентгенограмма продукта осаждения жидкого стекла раствором хлорида бария

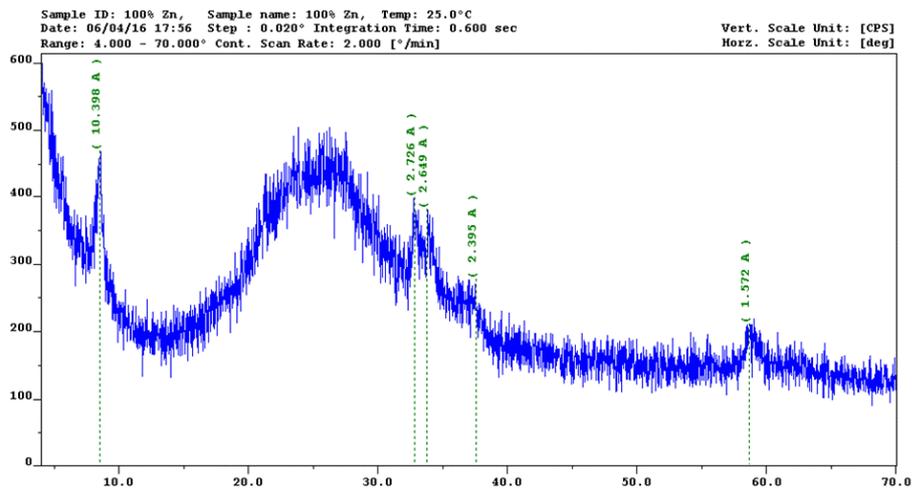


Рис. 8. Рентгенограмма биоцидного модификатора, получаемого осаждением гидросиликатов натрия раствором сульфата цинка

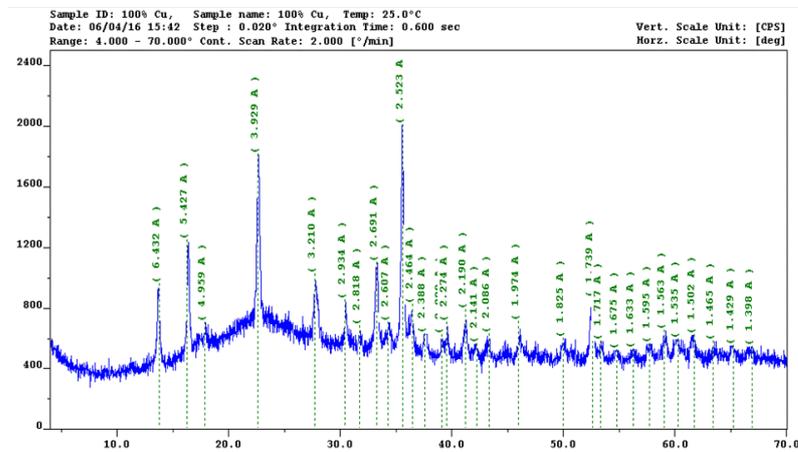


Рис. 9. Рентгенограмма продукта осаждения жидкого стекла сульфатом меди

Исследования структуры продуктов осаждения показывают, что основным продуктом синтеза является аморфное вещество и кристаллические примеси в виде витерита (карбоната бария), а при использовании солей цинка и меди при соотношениях $v(\text{ZnO})/v(\text{SiO}_2) = 1,0$ или $v(\text{CuO})/v(\text{SiO}_2) = 1,0$ образуются намуит ($\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), если применить сульфат цинка, и брошантит ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$) – при использовании сульфата меди. Установлено, что управлять составом продуктов осаждения можно, изменяя как рецептурные, так и технологические параметры синтеза. Образование карбоната бария происходит при интенсивном воздухоовлечении при перемешивании смеси, поэтому перемешивание компонентов синтеза должно проводиться без барботирования. При использовании солей амфотерных металлов содержание осадителя не должно превышать $v(\text{MeO})/v(\text{SiO}_2) = 0,9$.

Однако больший интерес представляет строение аморфных веществ (рис. 10-12).

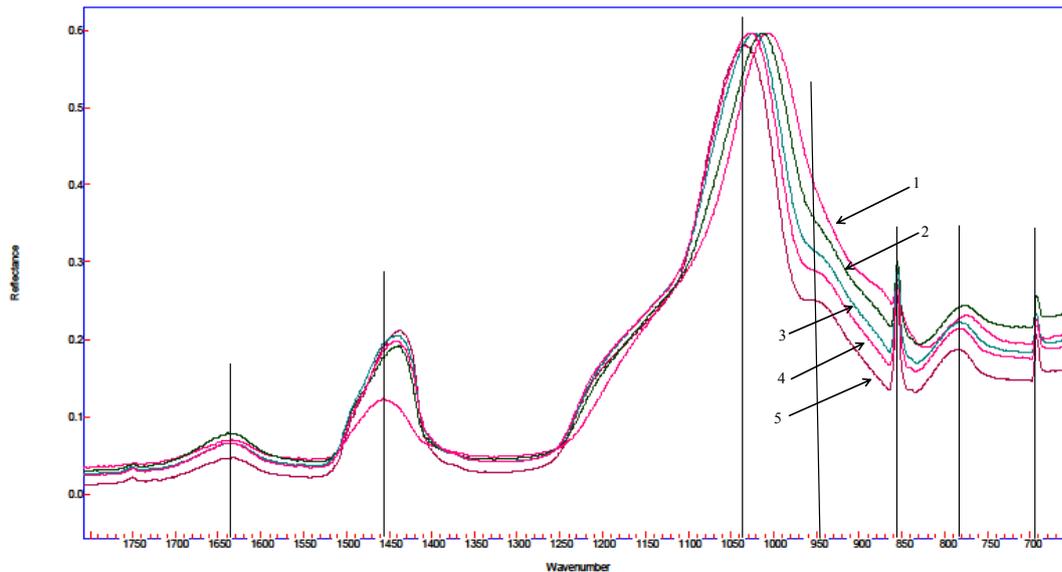


Рис. 10. ИК-спектрограммы гидросиликатов бария, синтезированных с использованием осадителя хлорида бария в количестве:
1 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 1,0$; 2 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,9$; 3 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,8$;
4 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,7$; 5 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,6$

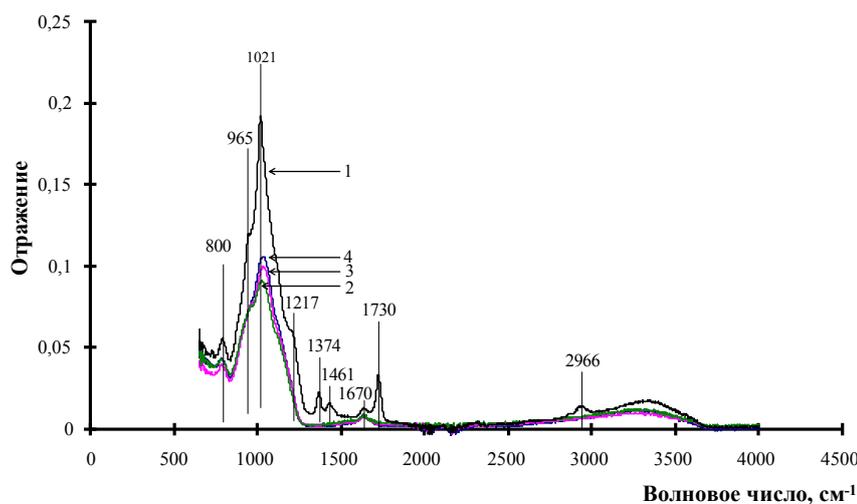


Рис. 11. ИК-спектрограммы гидросиликатов цинка, синтезированных с использованием осадителя сульфата цинка в количестве:
1 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 1,0$; 2 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,9$;
3 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,8$; 4 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,7$

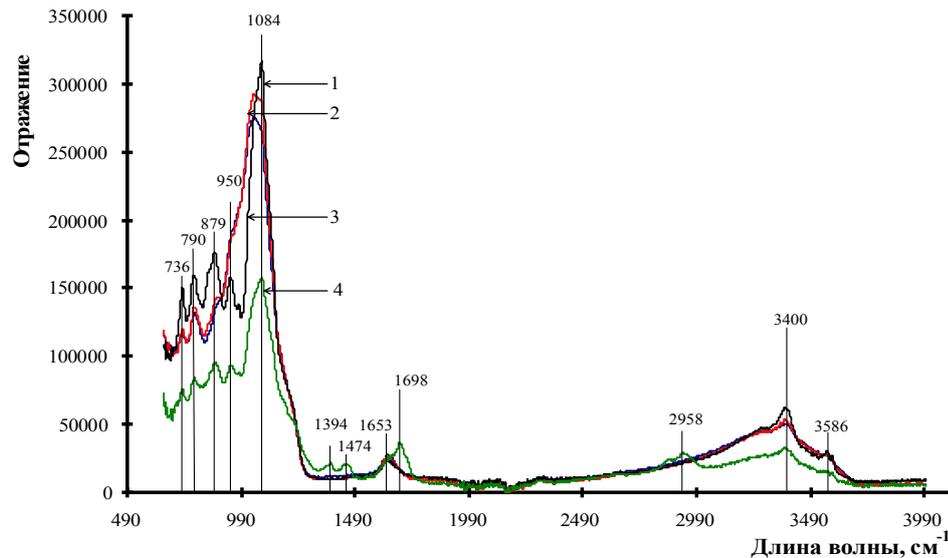


Рис. 12. ИК-спектрограммы гидросиликатов меди, синтезированных с использованием осадителя сульфата меди:

1 – $\nu(\text{CuO}) : \nu(\text{SiO}_2) = 0,9$; 2 – $\nu(\text{CuO}) : \nu(\text{SiO}_2) = 0,8$;
 3 – $\nu(\text{CuO}) : \nu(\text{SiO}_2) = 0,7$; 4 – $\nu(\text{CuO}) : \nu(\text{SiO}_2) = 1,0$

Все ИК-спектрограммы имеют отклик при $950\text{--}965\text{ см}^{-1}$, что указывает на наличие силанольной связи, а следовательно, радиационную стойкость и пуццолановую активность добавок, что подтверждается определением химической активности по методике, предложенной Ферронской А.В. Химическая активность составляет 48–54 %. Основной отклик $1021\text{--}1084\text{ см}^{-1}$ на всех спектрограммах указывает на валентные колебания силоксановой связи в слоистых силикатах. Поэтому при совмещении с вяжущим необходимо обеспечить диспергирование частиц гидросиликатов металлов. Широкий отклик при $780\text{--}800\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии во всех образцах конденсированных силикатов, которые в щелочной среде цементного теста могут деполимеризоваться. Широкий отклик при 1450 см^{-1} и узкие при 860 и 700 см^{-1} указывают на присутствие в составе карбонат-ионов [14]. Также на ИК-спектрах гидросиликатов меди и цинка при высоких концентрациях осадителя имеются дополнительные отклики, которые могут соответствовать примесям – $\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$.

Анализ термограммы гидросиликатов бария (рис. 13) показывает, что их дегидратация протекает в две стадии, что характерно для $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, отсутствуют аномалии при 310 , 360 и 420 °C , что свидетельствует об отсутствии в составе $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Эндотермические эффекты вызваны кристаллизацией аморфных форм дегидратированных силикатов бария. Кристаллизация аморфных фаз протекает при меньшей температуре, но с большей интенсивностью, что, вероятно, вызвано увеличением содержания кремниевой кислоты в составе продуктов осаждения.

Исследования состава добавки на основе гидросиликатов цинка (рис. 14) показывают, что с увеличением количества осадителя закономерно возрастает содержание гидросиликатов цинка, на что указывает смещение первого отклика в сторону больших температур. При 635 °C начинается кристаллизация метастабильного ромбического $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ с образованием при 760 °C виллемита ($\text{Zn}_2[\text{SiO}_4]$).

При проведении анализа термограмм гидросиликатов меди (рис. 15) было предварительно установлено, что в составе отсутствует гидроксид меди. На термограммах также отсутствуют аномалии, соответствующие карбонату и гидроксикарбонату меди. Температуры эндотермических эффектов более близки антрлериту (минимумы при 487 и 817 °C), чем брошантиту, имеющему экзотермический эффект при $520\text{--}540\text{ °C}$ [15], что может быть обусловлено изменением структуры гидросульфата меди при термическом воздействии: так, брошантит образуется при комнатной температуре, а антрлерит – при $50\text{--}60\text{ °C}$. Отклики, выраженные при высоком содержании осадителя, характеризуют наличие гидросульфата меди. Далее при нагревании протекает кристаллизация аморфных структур и при 1044 °C – разложение оксида меди.

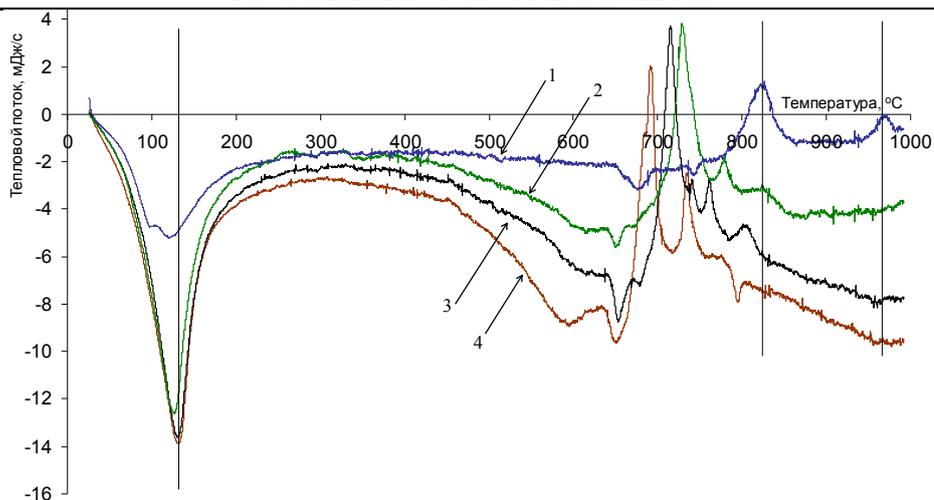


Рис. 13. Термограммы гидросиликатов бария, синтезированных с использованием осадителя хлорида бария в количестве:
 1 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 1,0$; 2 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,9$;
 3 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,8$; 4 – $v(\text{BaO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,7$

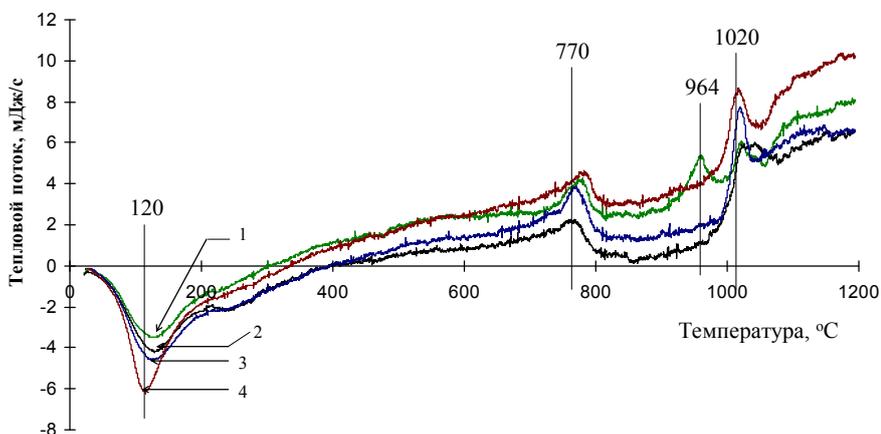


Рис. 14. Термограмма гидросиликатов цинка, синтезированных с использованием осадителя сульфата цинка в количестве:
 1 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 1,0$; 2 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,9$;
 3 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,8$; 4 – $v(\text{ZnO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,7$

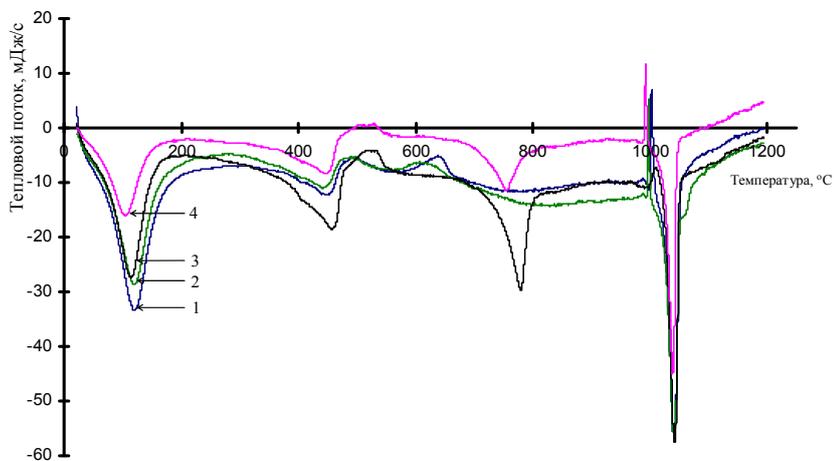


Рис. 15. Термограммы гидросиликатов меди, синтезированных с использованием осадителя сульфата меди:
 1 – $v(\text{CuO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,7$; 2 – $v(\text{CuO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,8$;
 3 – $v(\text{CuO}) : v(\text{SiO}_2) = 0,9$; 4 – $v(\text{CuO}) : v(\text{SiO}_2) = 1,0$

Выводы. Таким образом, показано, что при создании специальных вяжущих веществ к ним необходимо предъявлять дополнительные требования по структурным и эксплуатационным свойствам, которые можно реализовать за счёт выбора эффективного качественного и количественного состава материала, управления структурообразованием на нано- и микроуровнях. Для создания специального композиционного вяжущего, обладающего радиационно-защитными свойствами и устойчивостью к деформации, вызываемой воздействием биологического фактора, обосновано применение 19 химических элементов. Элементный состав эффективного радиационно-защитного материала предполагает возможность использования как нового вяжущего, технологию получения которого необходимо отдельно разрабатывать, так и уже известных вяжущих. В качестве такого вяжущего выбран портландцемент, состав которого должен быть модифицирован в соответствии с назначением создаваемого материала.

Среди выбранных радиационно-защитных элементов имеются те, что содержатся в фунгицидных агентах, – барий, цинк, медь, сера, бор и кислород. Для модифицирования портландцемента предлагается использовать гидросиликаты бария, цинка и меди, которые содержат фунгицидные металлы, имеют аморфную структуру и обладают пуццолановой активностью. Их применение целесообразно как для изменения химического состава вяжущего, так и для управления структурообразованием на различных структурных уровнях путем использования частиц разного размера.

Известные природные гидросиликаты меди и цинка имеют кристаллическую структуру и непостоянный состав. Поэтому была разработана технология синтеза нано- и микроразмерных гидросиликатов указанных металлов, имеющих стабильный химический состав и регулируемые геометрические характеристики частиц.

Разработана технология синтеза наноразмерных гидросиликатов бария, меди и цинка с диаметром частиц 15-50 нм, концентрацией коллоидных растворов 0,028-0,175 %. Показано, что фактический состав наноразмерных гидросиликатов соответствует теоретическому. Доказано формирование связи Me–O, что указывает на формирование гидросиликатов металлов. В составе гидросиликатов имеется силанольная связь, поэтому добавка обладает пуццолановой активностью. Коллоидные растворы сохраняют седиментационную устойчивость более 14 месяцев. Разработана технология синтеза микроразмерных гидросиликатов бария, меди и цинка, которые содержат силанольную связь, являются гидрофильными аморфными веществами, что свидетельствует об их пуццолановой активности и радиационной стойкости. Указанные модификаторы целесообразно использовать для изготовления специального композиционного вяжущего.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы / Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 9–14.
2. Гарькина, И.А. Системный подход к разработке материалов: модификация метода Паттерн / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 400–405.
3. Данилов, А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 168 с.
4. Чернышов, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории / Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж : ВГАСУ, 2012. – 98 с.
5. 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 : ПГУАС, 2009. – 132 с.
6. Данилов, А.М. Строительные материалы как системы / А.М. Данилов, Е.В. Королев, И.А. Гарькина // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 55–57.

7. Sharafutdinov, K.B. The use of copper nanomodified calcium carbonate as a bactericidal additive for concrete / K.B. Sharafutdinov, K.A. Saraykina, G.G. Kashevarova [et all.]. – DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-143-155 // International journal for computational civil and structural engineering. – 2022. – No 18(2). – P. 143–155.

8. Mohsen, A. Rheological behaviour, mechanical performance, and anti-fungal activity of OPC-granite waste composite modified with zinc oxide dust / A. Mohsen, M. Ramadan, M. Gharieb [et all.] // Journal of cleaner production. – 2022. – Vol. 341(2). – 130877.

9. Латышевич, И.А. Бицидные добавки (обзор) / И.А. Латышевич, Е.И. Гапанькова, Н.Г. Козлов [и др.]. – DOI 10.36807/1998-9849-2024-69-95-59-68 // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2024. – № 69(95). – С. 59–68.

10. Искужина, Р.Р. Новые фунгициды на основе боратов / Р.Р. Искужина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 5–3. – С. 149.

11. Зинченко, В.А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность / В.А. Зинченко. – Москва : Колос, 2012. – 247 с.

12. Козлова, И.В. Эффективность применения полифункциональной добавки на основе титанатов висмута для цементных композиций / И.В. Козлова, М.О. Дударева, Д.С. Сенюшкин [и др.]. – DOI: 10.62980/2076-0655-2024-323-332 // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 4. – С. 323–332.

13. Бекман, И.Н. Ядерная индустрия : курс лекций / И.Н. Бекман. – Москва : Изд-во МГУ, 2005. – 867 с.

14. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – Москва : Мир, 1991. – 536 с.

15. Куликов, А.Б. Синтез и свойства гидрокосульфатов меди, меди-никеля и меди-кобальта : автореферат дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01 / Куликов Альберт Борисович. – Москва, 2004. – 16 с.

References

1. Korolev, E.V. Technical and economic efficiency and promising building materials / E.V. Korolev // Regional architecture and Engineering. – 2013. – No 3. – P. 9–14.

2. Garkina, I.A. A systematic approach to the development of materials: modification of the Pattern method / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Bulletin of MGSU. – 2011– No 2. – P. 400–405.

3. Danilov, A.M. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza : PGUAS, 2014. – 168 p.

4. Chernyshov, E.M. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites: issues of material generalization and theory development / E.M. Chernyshov, E.I. Dyachenko, A.I. Makeev. – Voronezh : VGASU, 2012. – 98 p.

5. Korolev, E.V. Methods and algorithm for the 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 : PGUAS, 2009. – 132 p.

6. Danilov, A.M. Building materials as systems / A.M. Danilov, E.V. Korolev, I.A. Garkina // Building materials. – 2006. – No. 7. – P. 55–57.

7. Sharafutdinov, K.B. The use of copper nanomodified calcium carbonate as a bactericidal additive for concrete / K.B. Sharafutdinov, K.A. Saraykina, G.G. Kashevarova [et all.]. – DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-143-155 // International journal for computational civil and structural engineering. – 2022. – No 18(2). – P. 143–155.

8. Mohsen, A. Rheological behaviour, mechanical performance, and anti-fungal activity of OPC-granite waste composite modified with zinc oxide dust / A. Mohsen, M. Ramadan, M. Gharieb [et all.] // Journal of cleaner production. – 2022. – Vol. 341(2). – 130877.

9. Latyshevich, I.A. Biocidal additives (review) / I.A. Latyshevich, E.I. Gapankova, N.G. Kozlov [et all.]. – DOI 10.36807/1998-9849-2024-69-95-59-68 // Proceedings of the

St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). – 2024. – № 69(95). – P. 59–68.

10. Iskuzhina, R.R. New fungicides based on borates / R.R. Iskuzhina // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 13, No 5–3. – P. 149.

11. Zinchenko, V.A. Chemical plant protection: means, technology and environmental safety / V.A. Zinchenko. – Moscow: Kolos, 2012. – 247 p.

12. Kozlova, I.V. The effectiveness of using a multifunctional additive based on bismuth titanates for cement compositions / I.V. Kozlova, M.O. Dudareva, D.S. Senyushkin [et al.]. – DOI: 10.62980/2076-0655-2024-323-332 // Silicate engineering and technology. – 2024. – Vol. 31. – No 4, P. 323–332.

13. Bekman, I.N. Nuclear industry: A course of lectures / I.N. Bekman. – Moscow : Publishing House of Moscow State University, 2005. – 867 p.

14. Nakamoto, K. IR and RAMAN spectra of inorganic and coordination compounds / K. Nakamoto. – Moscow : Mir, 1991. – 536 p.

15. Kulikov, A.B. Synthesis and properties of hydroxosulfates of copper, copper-nickel and copper-cobalt : abstract of the dissertation. ... Candidate of Chemical Sciences: 02.00.01 / Kulikov Albert Borisovich. – Moscow, 2004. – 16 p.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2026_1_48

*Самарский государственный технический университет**Samara State Technical University*Россия, 443100, Самара,
ул. Молодогвардейская, д. 244Russia, 443100, Samara, 244,
Molodogvardeyskaya St.**Сидоренко Юлия Викторовна**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Производство строительных
материалов, изделий и конструкций»
E-mail: sm-samgasa@mail.ru**Sidorenko Yulia Viktorovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Production of building
materials, products and structures»
E-mail: sm-samgasa@mail.ru**Фролов Евгений Игоревич**,
кандидат химических наук, зав. кафедрой
«Производство строительных материалов,
изделий и конструкций»
E-mail: frolov.ei@samgtu.ru**Frolov Evgeniy Igorevich**,
Candidate of Chemical Sciences, Head of the
department «Production of building materials,
products and structures»
E-mail: frolov.ei@samgtu.ru

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №ФСФЕ-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

ЦЕМЕНТСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Ю.В. Сидоренко, Е.И. Фролов

В связи с истощением запасов природных сырьевых ресурсов для производства цементосодержащих материалов невысоких марок по прочности предлагается использовать отходы отсевов дробления и переработки ряда местных осадочных пород, что позволит улучшить физико-механические параметры. Приводятся результаты исследования влияния порошкообразного диатомита на свойства кладочных растворов и отсевов дробления карбонатных пород, на свойства мелкозернистых бетонов. Экспериментально установлен оптимальный процент тонкодисперсных компонентов.

Ключевые слова: цементосодержащие материалы, мелкозернистые бетоны, кладочные растворы, прочность, тонкодисперсные композиты

CEMENT-CONTAINING MATERIALS WITH WASTES OF SEDIMENTARY MIDDLE VOLGA'S REGION ROCKS

Yu.V. Sidorenko, E.I. Frolov

Due to the depletion of reserves of natural raw materials for the production of cement-containing materials of low brands, it is proposed to use the wastes of crushing and processing a number of local sedimentary rocks, which allows to improve physical and mechanical parameters. The results of researching the effect of powdered diatomite on the properties of masonry mortars and crushing carbonate species on the properties of fine-grained concretes are given. The optimal percentage of fine components is experimentally established.

Keywords: cement-containing materials, fine-grained concrete, masonry mortars, strength, finely dispersed composites

Введение. Регионы Среднего Поволжья отличаются промышленно развитым потенциалом, включая сферу строительства, где наряду с универсальными бетонными изделиями и конструкциями для сборного и монолитного домостроения не снижают своей востребованности цементосодержащие материалы невысоких классов В3,5-В20 и плотностью до 2300 кг/м³, в частности мелкозернистые бетоны (МЗБ), кладочные растворы и т.д. Ввиду необходимости сохранения природной среды от промышленного загрязнения и образующихся отходов внедрение принципов энерго-

ресурсосбережения позволяет создать благоприятные условия для изготовления качественных и долговечных изделий с привлечением регионального техногенного сырья; в основном отсева дробления осадочных пород (высевки, крошка, пыль, мука), использующиеся лишь частично, накапливаются в отвалах [1].

Теоретический анализ. Как известно, большинство авторов [1-20] положительно высказываются о влиянии неорганических нано- и тонкодисперсных добавок на структуру и свойства цементных материалов за счет рационального подбора гранулометрического состава компонентов смеси, что позволяет коагулировать поры в цементном камне, снижая влияние усадки и сохраняя необходимые технологические и эксплуатационные характеристики. Кроме того, например, диатомиты и карбонатные породы в ряде случаев химически активны и участвуют в процессах гидратации и кристаллизации цементного камня [2-6, 15-17].

Несмотря на существенный потенциал использования тонкодисперсных отходов в цементных материалах, существуют и сложности в использовании неоднородных по составу компонентов, что сужает возможности применения этих экологически безопасных минеральных материалов.

В современном строительном материаловедении все еще отсутствуют единые обоснованные рекомендации по производству цементных материалов на основе региональных отходов добычи и переработки осадочных горных пород. В связи с этим целью работы является изготовление цементсодержащих материалов с использованием отходов дробления осадочных горных пород Среднего Поволжья.

Экспериментальная часть

Кладочные растворы – традиционно применяемый материал при возведении зданий и сооружений. Целесообразно использовать активные минеральные тонкодисперсные компоненты для повышения прочностных, адгезионных характеристик, морозостойкости и снижения средней плотности. Например, диатомит как сырьевой компонент кладочных растворов целесообразен ввиду его немалых запасов и возможности добычи открытым способом [3-5, 18].

В ходе исследований применялся порошкообразный диатомит (Ульяновская обл.) в качестве частичной замены мелкого заполнителя [18].

Изготовление растворов для кладочных работ осуществлялось с использованием стандартных технологических приемов (ГОСТ 28013-2023, ГОСТ Р 58766-2019, ГОСТ Р 57337-2016).

Было исследовано влияние указанной минеральной добавки на свойства растворов.

Изготовлены:

– стандартная цементно-песчаная смесь;

– цементно-песчаная смесь с добавлением измельченного диатомита в размере 5 % от массы цемента.

В ходе испытаний растворной смеси были изготовлены стандартные образцы-кубы (70,7×70,7×70,7 мм) и образцы-балочки (40×40×160 мм).

При проведении исследований применялись:

– портландцемент ЦЕМ II /А-П 32,5 Н (ООО “АзияЦемент”, Пензенская обл.), соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020; содержание от 6 до 20 % пуццолановых добавок повышает стойкость цементного камня к коррозионным процессам;

– песок для строительных работ (месторождение Ширяевское, Самарская обл.), соответствующий требованиям ГОСТ 8735-88, ГОСТ 8736-2014; средняя плотность 1470 кг/м³, модуль крупности 1.65;

– диатомит в виде порошка, представляющий собой тонкодисперсный высокопористый диоксид кремния, получаемый в результате комбинированной термомеханической обработки осадочной горной породы – диатомита; его характеристики представлены в табл. 1;

– вода обычная водопроводная, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Для понимания эффективности использования диатомита в кладочных растворах были экспериментально изготовлены два состава и определены для них основные физико-механические характеристики.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики диатомитового порошка

Наименование показателя	Значение
Массовая доля SiO ₂	83,4 %
Массовая доля Al ₂ O ₃	2,5 %
Массовая доля Fe ₂ O ₃	1,5 %
Суммарная массовая доля CaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O	3,2 %
п.п.п.	9,4 %
Массовая доля остатка на сите №01 (по ГОСТ 6613), не более	< 10,0 %
Насыпная плотность	< 400,0, кг/м ³
Пуццолановая активность	120-200 мг/г

Состав №1

Стандартная цементно-песчаная смесь в соотношении Ц:П:В – 1:2:0,64.

Глубина погружения конуса – 8,2 см.

Расплыв конуса – 17,9 см.

Плотность смеси – 1860 кг/м³.

Результаты испытаний затвердевшего раствора приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний затвердевшего раствора №1

Наименование показателя	Значение	
	Образцы-кубы	Образцы-балочки
Средняя плотность, кг/м ³	1720	
Прочность на сжатие, кгс/см ²	308,1	301,1*
Прочность на изгиб, кгс/см ²	-	46,1

* *Использовали половинки образцов-балочек.*

В кладочных растворах обычно применяются вяжущие с активностью, превышающей прочность раствора в 3-5 раз. Обеспечивается получение марки раствора М75, что достаточно для кладки наружных стен.

Состав №2

Цементно-песчаная смесь с добавлением диатомита в соотношении Ц:Д:П:В – 1:0,05:1,95:0,7.

Глубина погружения конуса – 8,0 см.

Расплыв конуса – 17,6 см.

Плотность смеси – 1780 кг/м³.

Результаты испытаний затвердевшего раствора приведены в табл.3.

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний затвердевшего раствора №2

Наименование показателя	Значение	
	Образцы-кубы	Образцы-балочки
Средняя плотность, кг/м ³	1650	
Прочность на сжатие, кгс/см ²	308,4	303,8*
Прочность на изгиб, кгс/см ²	-	47,3

* *Использовали половинки образцов-балочек.*

Отмечаются меньшие показатели глубины погружения и расплыва конуса вследствие высокой пористости и адсорбирующей способности диатомита, повышение вязкости смеси и необходимость увеличения расхода воды, однако в итоге

наблюдаются достаточная адгезионная прочность с кирпичным основанием для наружных работ (не менее 0,5 МПа) и водоудерживающая способность смеси (не менее 90 %). Следует указать на снижение плотности при сохранении марки раствора (М75) вследствие гидравлической активности диатомита.

Мелкозернистый бетон в настоящее время весьма востребован для дорожных, ремонтных, декоративно-отделочных составов, в ландшафтном дизайне и т.д. [12-17, 19-22]. Применение минеральных добавок (МД) по ГОСТ Р 56592-2015, включая местные отходы дробления карбонатных пород, и химических добавок по ГОСТ Р 56178-2014 с целью улучшения удобоукладываемости и сокращения расхода составных компонентов (цемента и природного песка) является одной из особенностей изготовления МЗБ.

В [21] отмечается, что «... в зависимости от вида МД и способа введения (взамен части цемента, т.е. при повышении В/Ц, либо взамен части песка, т.е. при неизменном В/Ц) зафиксированы: рост водопотребности до 41 %, индекса водоотделения до 42 %, изменения индекса активности на сжатие от 0,57 до 1,75, при изгибе до 2,0».

Автор [22] сообщает, что «... ГОСТ 31108-2003... разрешено в производстве портландцемента использование карбонатсодержащих добавок, значительно повысилось внимание исследователей к изучению влияния этих добавок на свойства получаемых портландцементов. В настоящее время многие производители цемента вводят до 5 % известняка в качестве вспомогательного компонента. Однако не существует каких-либо рекомендаций по особенностям использования портландцемента с карбонатными добавками, несмотря на то, что при характеристике влияния этих добавок некоторыми авторами отмечалась возможность резкого снижения прочности цементов с добавками известняка, особенно при повышенных температурах».

«Благоприятное влияние карбонатных добавок на снижение водоотделения композиционных портландцементов, вероятно, связано с образованием в начальный период повышенного количества продуктов гидратации, находящихся в коллоидном состоянии и обладающих высокой водоудерживающей способностью. При гидратации портландцементов, содержащих в составе комплексной добавки доломит, положительное влияние может оказывать гидроксид магния, образующийся при взаимодействии гидрокарбоната магния с гидроксидом кальция» [22].

Чаще всего отсеvy дробления карбонатных пород не подвергаются строгой очистке (и в них могут присутствовать примеси, способные оказать влияние на характеристики бетона), поэтому их используют при условии, что к МЗБ не предъявляются высокие требования. В дальнейшем целесообразна работа по определению реакционной способности сырья на основе карбонатов кальция и магния.

Было исследовано влияние отсеvов дробления карбонатных пород на свойства МЗБ при частичной замене мелкого природного песка.

В ходе испытаний применялись:

– портландцемент ЦЕМ I 32,5Н (ООО «ТимлюйЦемент», Республика Бурятия), соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020;

– песок для строительных работ (месторождение Ширяевское, Самарская обл.), соответствующий требованиям ГОСТ 8735-88, ГОСТ 8736-2014; средняя плотность 1470 кг/м³, модуль крупности 1.65;

– отсеvy дробления карбонатных пород АО «Сокское карьероуправление» (Самарская область); поверхность частиц шероховатая; химический состав см. в табл. 4 [23, 24];

– вода обычная водопроводная по требованиям ГОСТ 23732-2011.

Отсеvy дробления и мука карбонатных пород нетоксичны, пожаро- и взрывобезопасны (IV класс опасности); при работе необходимы выполнение требований по организации пылеулавливания и пылеподавления, обеспечение персонала спецодеждой и средствами защиты по ГОСТ 12.1.005-88.

При оценивании характеристик отсеvов дробления карбонатных пород следует руководствоваться данными ГОСТ 31424-2010 и ГОСТ 8736-2014.

Химический состав отсевов Сокского карьера, Самарской области

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	п.п.п.
1,50	0,50	36,08	16,21	-	49,19

Технологические характеристики отсевов:

истинная плотность – 2500 кг/м³;

насыпная плотность – 1500 кг/м³;

модуль крупности $M_{кр}$ для отсева фр. 0-10 ~ 2,03;

морозостойкость F – 25;

$S_{удел} \sim 2750$ см²/г;

удельная эффективная активность естественных радионуклидов ($A_{эфф}$) не более 370 Бк/кг (по ГОСТ 30108-94).

В составах МЗБ обычно применяется песок нескольких фракций (с использованием сит с ячейками 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм и 0,315 мм); в итоге крупный песок составляет 30-50 %, остальная часть представлена более мелким песком). В применяемом песке частицы фр. 5 практически отсутствуют, частиц фр. 2,5, 1,25 и 0,63 менее 10 % (рис. 1) [20].

По показателям гранулометрического зернового состава и $M_{кр}$ отсевы дробления карбонатных пород относятся к пескам средней крупности (рис.2) [20].

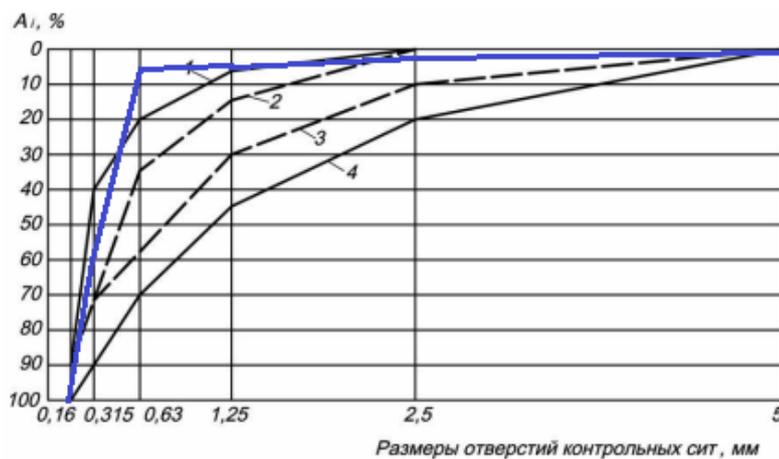


Рис. 1. График зернового состава песка:

1 – допустимая нижняя граница крупности песка ($M_k = 1,5$); 2 – рекомендуемая нижняя граница крупности ($M_k = 2,0$) для бетонов класса В15 и выше; 3 – рекомендуемая нижняя граница ($M_k = 2,5$) для бетонов класса В25 и выше; 4 – допустимая верхняя граница крупности ($M_k = 3,25$)

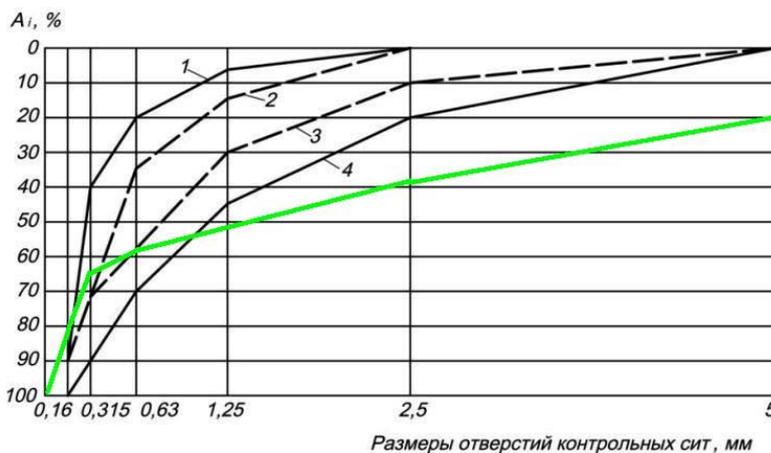


Рис. 2. График зернового состав отсева дробления карбонатных пород фр. 0 – 10 мм

По зерновому составу местное сырье не относится к стандартным заполнителям по ГОСТ 8736-2014, поэтому представляется целесообразным получение рациональной зерновой смеси для изготовления МЗБ.

В ходе исследований определено, что смесь характеризуется графиком гранулометрического состава (рис. 3) [20], который приближается к оптимальной гранулометрии; состав заполнителя содержит 60 % песка и 40 % отсева дробления карбонатных пород фр. 0,63...2,5 мм. Рассчитанный $M_{кр}$ равен 2,45; данный состав соответствует стандартному заполнителю средней крупности.

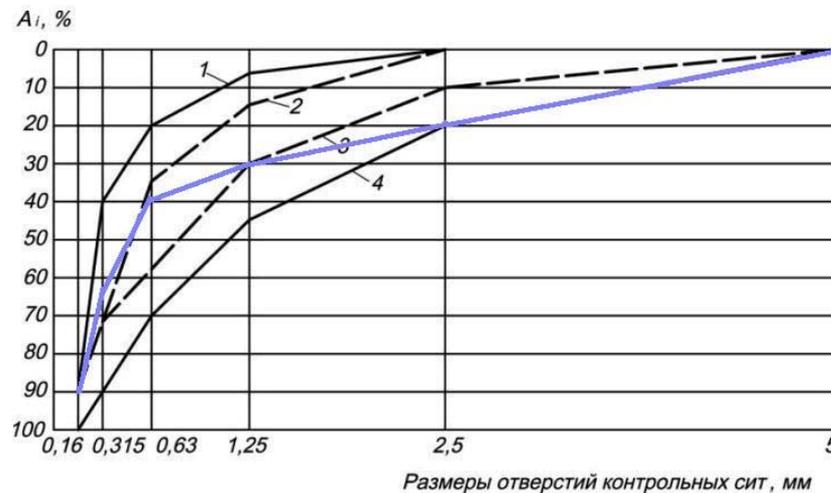


Рис. 3. График зернового состава смеси на основе песка и отсева дробления карбонатных пород (в соотношении 60:40 соответственно)

Подбор составов смесей и оценка их свойств, прочность бетонных образцов (образцы-кубы размером 70,7×70,7×70,7 мм и образцы-балочки размером 40×40×160 мм) проводились с учетом требований ГОСТ 7473-2010, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 26633-2015, ГОСТ 31384-2017 и ГОСТ 27006-2019. Изготовленные образцы хранились в нормальных условиях, прочность оценивалась на 28-е сутки твердения.

Составы МЗБ изготовлены в соответствии с данными СН 488-76 и [25, 26], проведена корректировка по показателям испытаний бетонных образцов.

При применении песков средней крупности наиболее экономичны составы МЗБ с соотношением Ц : П в диапазоне от 1:2 до 1:3. В ходе работы применялись смеси состава цемент : заполнитель 1:2,5 (включающие в том числе зерновую смесь песка и отсева); количество отсева дробления в смесях варьировалось от 10 до 70 %.

В контрольном (бездобавочном) составе расход цемента составил 396 кг/м³, песка – 991 кг/м³, воды – 211 л/м³.

Удобоукладываемость смеси оценивалась по распылу малого конуса, который регулировался содержанием воды, и составляла в пределах 105-115 мм. Корректировка количества воды проводилась во время лабораторных замесов.

При одинаковом В/Ц содержание отсева дробления в смеси с песком существенно влияет на удобоукладываемость: при увеличении расхода отсева подвижность смеси уменьшается.

Применение заполнителя из природного песка с отсевами дробления в диапазоне 30-50 % способствует росту предела прочности на сжатие:

- контрольный (бездобавочный) состав МЗБ при В/Ц ~ 0,53: $R_{сж} = 27,8$ МПа;
- состав МЗБ (добавка отсева: 40 %) при В/Ц ~ 0,51: $R_{сж} = 31,2$ МПа.

Смеси с песком и отсевами дробления карбонатных пород способствуют уменьшению В/Ц и увеличению прочности при сжатии в среднем на 12 %.

Улучшать качество МЗБ можно, применяя различные добавки (в частности MasterGlenium® 51 – суперпластифицирующая добавка на основе модифицированного

поликарбоксильного эфира; расходуется в среднем в интервале 0,2...1 % добавки от массы цемента, которая вводится в бетонную смесь вместе с водой затворения (предпочтительно с последней, третьей, частью воды) [17, 27-29]. При работе с химическими добавками должны соблюдаться требования техники безопасности, применяться приточно-вытяжная вентиляция и средства для защиты работающего персонала.

Используя заполнитель из природного песка с отсевами дробления и добавку MasterGlenium®51, наблюдаем снижение В/Ц и рост предела прочности на сжатие:

– состав МЗБ (добавка отсева 40 %; добавка MasterGlenium®51 составляет 0,4 %) при В/Ц ~ 0,48: $R_{сж} = 35,8$ МПа.

Средняя плотность изготовленных образцов составляет от 2020 до 2150 кг/м³.

Локальные участки цементно-песчаной матрицы в образцах представлены на рис. 4 и 5 [20].

Мелкие замкнутые поры в цементном камне заполнены воздухом, открытые макропоры присутствуют в небольшом количестве.

На рис. 5 можно отметить малый объем открытых макропор и достаточно плотную структуру. Частицы отсевов равномерно распределились по объему матрицы бетонной смеси в ходе последующего твердения.



Рис. 4. Фрагмент цементно-песчаной матрицы, не содержащей минеральную и химическую добавки



Рис. 5. Фрагмент цементно-песчаной матрицы с добавкой отсевов дробления карбонатных пород и добавкой MasterGlenium®51

Присутствие минеральной и химической добавок снижает В/Ц, улучшает однородность структуры, уменьшает пористость материала.

Выводы. Отходы добычи и дробления осадочных горных пород регионов Среднего Поволжья – ценное сырье техногенного характера; их применение в практике строительного производства способствует улучшению процессов структурообразования и строительно-технических характеристик цементсодержащих материалов, а также сокращению расхода природного мелкого заполнителя.

Растворная смесь с добавкой диатомита 5 % от массы цемента показала снижение плотности на 4,1 % по сравнению со стандартной смесью при сохранении марки М75. В ходе испытаний с диатомитом наблюдалось повышение вязкости смеси, что

потребовало введения большего количества воды, однако этого можно избежать, применяя добавки – суперпластификаторы.

Подтверждается возможность изготовления мелкозернистых бетонов классов по прочности В15...В20 с использованием местных отсеков дробления карбонатных пород, соответствующих требованиям нормативных документов.

Список литературы

1. Копаница, Н.О. Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, А.А. Куликова, Е.В. Ткач, Н.И. Шестаков, И.В. Степина. – DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4304 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, №10. – С. 49–60.
2. Черкасов, В.Д. Активная минеральная добавка на основе химически модифицированного диатомита / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Е.В. Киселев, Д.В. Черкасов // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 12. – С. 50–55.
3. Бузулуков, В.И. Эффективность применения карбонизированного диатомита в цементных композитах / В.И. Бузулуков, В.Т. Ерофеев, А.И. Емельянов, Д.В. Черкасов // Технологии бетонов. – 2015. – № 1–2. – С. 30–31.
4. Janotka, I. et al. Natural and calcimined diatomite as cement replacement materials: microstructure and pore structure study / I. Janotka [et al.] // NTCC 2014: International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete, 2014, June 16–19, Brno, Czech Republic. – P. 99–100.
5. Пустовгар, А.П. Эффективность применения активированного диатомита в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 2–4.
6. Тараканов, О.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ / О.В. Тараканов, Ю.Г. Иващенко, И.В. Ерофеева. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_47 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С. 47–58.
7. Морозова, Н.Н. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем / Н.Н. Морозова, Е.Г. Гуляков. – DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27 // Известия КГАСУ. – 2023. – № 2 (64). – С. 27–39.
8. Plank, J. Competitive adsorption between superplasticizer and retarder molecules on mineral binder surface / J. Plank J., C. Winter. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.12.003 // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38, № 5. – P. 599–605.
9. Лазуткин, А.В. Использование отсеков дробления – важный фактор экономического роста предприятий нерудной промышленности / А.В. Лазуткин, В.И. Эйрих, В.П. Жуков // Строительные материалы. – 2003. – № 11. – С. 6–7.
10. Шелихов, Н.С. Комплексное использование карбонатного сырья для производства строительных материалов / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов // Строительные материалы. – 2006. – № 9. – С. 42–44.
11. Scrivener, K.L. Innovation in use and research on cementitious material / K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick // Cement Concrete Research. – 2008. – № 38 (2). – P. 128–136.
12. Bazhenov, Y. Concrete composites of double structure formation / Y. Bazhenov, L. Alimov, V. Voronin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 117. – P. 00015.
13. Oshio, A. Properties of concrete containing mineral powders / A. Oshio, T. Sone, A. Matsui // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 114–117.
14. Минаков, Ю.А. Исследование свойств бетонов на основе осадочных пород / Ю.А. Минаков, А.М. Краснов, О.В. Кононова, В.Д. Черепов, Е.А. Солдатова // Известия КазГАСУ. – 2011. – №3 (17). – С. 122–128.
15. Плугин, А.А. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений / А.А. Плугин, Т.А. Костюк, М.Г. Салия, Д.А. Бондаренко // Сборник научных трудов института строительства и архитектуры. – Москва : МГСУ, 2012. – С. 224–227.

16. Красильникова, О.А. Использование техногенных отходов карбонатных пород в производстве бетонов : дис. ... магистра технических наук : 08.04.01 / О.А. Красильникова ; [Тольяттинский государственный университет]. – Тольятти, 2019. – 73 с.
17. Белов, В.В. Механические свойства мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, включающей тонкодисперсный известняковый наполнитель и суперпластификатор / В.В. Белов, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257 // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 251–257.
18. Дмитриев, Е.М. Эффективный кладочный раствор для малоэтажного строительства : дис. ... магистра технических наук : 08.04.01 / Е.М. Дмитриев ; [Самарский государственный технический университет]. – Самара, 2023.
19. Соколова, С.В. Оптимизация физико-механических свойств бетонов специального назначения / С.В. Соколова, Ю.В. Сидоренко. – DOI: 10.54734/20722958_2025_2_105 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 105–113.
20. Поликарпов, Н.С. Изучение процессов структурообразования и свойств мелкозернистых бетонов : дис. ... магистра технических наук : 08.04.01 / Н.С. Поликарпов ; [Самарский государственный технический университет]. – Самара, 2021.
21. Несветаев, Г.В. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов / Г.В. Несветаев, А.В. Козлов, Г.А. Козлов, И.А. Филонов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №11. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7972.
22. Малова, Е.Ю. Композиционные портландцементы с карбонатсодержащими добавками и бетоны на их основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Е.Ю. Малова ; [Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова]. – Барнаул, 2015. – 182 с.
23. Хлыстов, А.И. Минеральное тугоплавкое техногенное сырье – надежная сырьевая база для производства жаростойких материалов / А.И. Хлыстов, М.В. Коннов, А.В. Власов, Е.А. Чернова. – DOI: doi.org/10.17673/Vestnik.2011.04.17 // Градостроительство и архитектура. – 2011. – Т. 1, № 4. – С. 87–92.
24. Баранова, М.Н. Качественная характеристика карбонатных пород Сокского месторождения / М.Н. Баранова, Л.М. Бухман // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : сборник статей 77-й Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 26–30 октября 2020 года / под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, В.Ю. Алпатова. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2020. – С. 292–299.
25. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов: методическое пособие – Москва : АО «НИЦ Строительство», 2016. – 100 с.
26. Бруссер, М.И. Проектирование составов тяжелого и мелкозернистого бетона. Пути развития / М.И. Бруссер, С.А. Подмазова // Бетон и железобетон. – 2021. – № 604(2). – С.3–7.
27. Крамар, Л.Я. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Т.Н. Черных, А.А. Орлов, К.В. Шулдяков // Строительные материалы. – 2016. – № 11. – С. 21–25.
28. Лукутцова, Н.П. Эффективность суперпластификаторов в мелкозернистом бетоне с золошлаковой смесью / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, С.Н. Головин, А.В. Дудник, Н.В. Золотухина. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – №8. – С. 29–38.
29. Добавки в бетон: технический каталог – Москва : БАСФ «Строительные системы», 2014. – 141 с.

References

1. Kopanitsa, N.O. Secondary resources in production of composite building materials based on cement / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, A.A. Kulikova, E.V. Tkach, N.I. Shestakov, I.V. Stepin. – DOI:10.18799/24131830/2023/10/4304 // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2023. – Vol. 334, No. 10. – P. 49–60.
2. Cherkasov, V.D. Active mineral additive on the basis of chemically modified diatomite / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emel'yanov, E.V. Kiselev, D.V. Cherkasov // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2011. – No. 12. – P. 11–21.
3. Buzulukov, V.I. Effectiveness of carbonized diatomite in cement composites / V.I. Buzulukov, V.T. Erofeev, A.I. Emel'yanov, D.V. Cherkasov // Tekhnologii betonov. – 2015. – No. 1–2. – P. 30–31.
4. Janotka, I. Natural and calcimined diatomite as cement replacement materials: microstructure and pore structure study / I. Janotka [et al.] // NTCC 2014: International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete, 2014, June 16–19, Brno, Czech Republic. – P. 99–100.
5. Pustovgar, A.P. Effectiveness of the use of activated diatomite in dry building mixes / A.P. Pustovgar // Construction materials. – 2006. – No. 4. – P. 2–4.
6. Tarakanov, O.V. The effect of carbonate mineral additives on the formation of microstructure and strength of mineral binders / O.V. Tarakanov, Y.G. Ivashchenko, I.V. Erofeeva. – DOI:10.54734/20722958_2024_1_47 // Regional architecture and engineering. – 2024. – No. 1 (58). – P. 47–58.
7. Morozova, N.N. Properties of concrete based on zeolite-containing binder / N.N. Morozova, E.G. Gulyakov. – DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27 // News KSUAE. – 2023. – No. 2 (64). – P. 27–39.
8. Plank, J. Competitive adsorption between superplasticizer and retarder molecules on mineral binder surface / J. Plank, C. Winter. – DOI:10.1016/j.cemconres.2007.12.003 // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 5. – P. 599–605.
9. Lazutkin, A.V. Using of screening dust is important factor of economic advance of nonmetallic minerals industry / A.V. Lazutkin, V.I. Eirich, V.P. Zhukov // Construction materials. – 2003. – No. 11. – P. 6–7.
10. Shelikhov, N.S. The complex using of carbonate raw material for building materials production / N.S. Shelikhov, R.Z. Rakhmov // Construction materials. – 2006. – No. 9. – P. 42–44.
11. Scrivener, K.L. Innovation in use and research on cementitious material / K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick // Cement Concrete Research. – 2008. – No. 38 (2). – P. 128–136.
12. Bazhenov, Y. Concrete composites of double structure formation / Y. Bazhenov, L. Alimov, V. Voronin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 117. – P. 00015.
13. Oshio A. Properties of concrete containing mineral powders / A. Oshio, T. Sone, A. Matsui // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 114–117.
14. Minakov, Y.A. Study on properties of concrete based on sedimentary rocks / Y.A. Minakov, A.M. Krasnov, O.V. Kononova, V.D. Cherepov, E.A. Soldatova // News KSUAE. – 2011. – No. 3 (17). – P. 122–128.
15. Plugin, A.A. Use of carbonate additives in cement compositions for water-proofing and restoration work of buildings and structures / A.A. Plugin, T.A. Kostyuk, M.G. Salia D.A. Bondarenko // Collection of scientific works of the Institute of Construction and Architecture of Moscow State University. – Moscow, 2012. – P. 224–227.
16. Krasilnikova, O.A. The use of technogenic carbonate waste in concrete production : Thesis of Master of Technical Sciences : 08.04.01 / O.A. Krasilnikova ; [Togliatti State University]. – Togliatti, 2019. – 73 p.
17. Belov, V.V. Mechanical properties of fine-grained carbonate concretes with a complex additive, including fine limestone filler and superplasticizer / V.V. Belov, P.V. Kuliaev, T.R. Barkaya. –DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257 // Structural

Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2023. – Vol. 19, No. (2). – P. 251–257.

18. Dmitriev, E.M. Effective masonry solution for low-rise construction : Thesis of Master of Technical Sciences : 08.04.01 / E.M. Dmitriev ; [Samara State Technical University]. – Samara, 2023.

19. Sokolova, S.V. Optimization of physical and mechanical properties of special purpose concretes / S.V. Sokolova, Yu.V. Sidorenko. – DOI: 10.54734/20722958_2025_2_105 // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 2 (63). – P. 4–11.

20. Polikarpov, N.S. Studying the processes of structural formation and the properties of fine-grained concrete : Thesis of Master of Technical Sciences : 08.04.01 / N.S. Polikarpov ; [Samara State Technical University]. – Samara, 2021.

21. Nesvetaev, G.V. The influence of some mineral additives on the properties of fine-grained concrete / G.V. Nesvetaev, A.V. Kozlov, G.A. Kozlov, I.A. Filonov // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2022. – No. 11. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7972

22. Malova, E.Yu. Compositional Portland cements with carbonate additives and concrete based on them : Thesis of Candidate of Technical Sciences : 05.17.11 / E.Yu. Malova ; [Polzunov Altai State Technical University]. – Barnaul, 2015. – 182 p.

23. Khlystov, A.I. Inorganic heat resistant industrial wastes as raw material base for manufacture of heat resistant kiln materials / A.I. Khlystov, M.V. Connov, A.V. Vlasov, E.A. Chernova. – DOI: 10.17673/Vestnik.2011.04.17 // Urban construction and architecture. – 2011. – Vol. 1. – No. 4. – P. 87–92.

24. Baranova, M.N. Qualitative characteristics of carbonate rocks of Sok deposit / M.N. Baranova, L.M. Bukhman // Traditions and innovations in construction and architecture: collection of materials of the 77th All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, October 26-30, 2020 / edited by M.V. Shuvalov, A.A. Pishichulev, V.Yu. Alpatov. – Samara : Samara State Technical University, 2020. – P. 292–299.

25. Recommendations for the selection of components of concrete mixtures for heavy and fine-grained concrete: methodological manual. – Moscow : JSC «Scientific Research Center Construction», 2016. – 100 p.

26. Brusser, M.I. Design of heavy and fine-grained concrete compositions. Ways of development / M.I. Brusser, S.A. Podmazova // Concrete and Reinforced Concrete. – 2021. – No. 604 (2). – P. 3–7.

27. Kramar, L.Ya. Modern superplasticizers for concretes, features of their application and effectiveness / L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov, T.N. Chernyh, A.A. Orlov, K.V. Shuldyakov // Construction materials. – 2016. – No. 11. – P. 21–25.

28. Lukutsova, N.P. Efficiency of superplasticizers in fine-grained concrete with ash and slag mixture / N.P. Lukutsova, A.A. Pykin, S.N. Golovin, A.V. Dudnik, N.V. Zolotukhina/ – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38// Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2024. – No. 8. – P. 29–38.

29. Concrete addition: technical catalog – Moscow : BUSF “Construction Chemicals”, 2014. – 141 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

Москвин Роман Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Эксплуатация автомобильного
транспорта»
E-mail: moskva_in@mail.ru

Белякова Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: var_lena@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

Moskvin Roman Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Operation of Automobile
Transport»
E-mail: moskva_in@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Real estate cadastre and right»
E-mail: var_lena@mail.ru

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОБОСНОВАННОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЧЕРЕЗ ДИФфуЗИОННО-РАСТВОРНЫЙ МЕХАНИЗМ ТВЕРДЕНИЯ ШЛАКОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЗИТОВ

Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова

Раскрыт механизм твердения композиционных высоконаполненных минерально-шлаковых вяжущих с малым количеством шлака. Определено, что прочность всей системы напрямую зависит от прочности матрицы в межчастичном пространстве шлаковых зерен, т.е. от количества продиффузировавших ионов вяжущего и качества образовавшегося в контактах частиц цементирующего клея.

Установлено, что отвердевание высоконаполненных минерально-шлаковых вяжущих с малым количеством шлака осуществляется по ионно-диффузионному сквозьрастворному механизму массопереноса и цементирования частиц малоактивных горных пород продуктами гидратации шлака, а частиц высокоактивных горных пород – более сложными продуктами совместного взаимодействия шлака и горных пород. Топохимический механизм отвердевания таких вяжущих совершенно несущественен и проявляется лишь в контактной зоне частиц шлака и горной породы.

Ключевые слова: высоконаполненные минерально-шлаковые вяжущие, формирование прочности, топология, сквозьрастворный механизм твердения, механизм массопереноса

TOPOLOGICAL VALIDITY OF STRENGTH FORMATION THROUGH THE DIFFUSION-SOLUTION HARDENING MECHANISM OF SLAG-MINERAL COMPOSITES

R.N. Moskvin, E.A. Belyakova

The mechanism of hardening highly filled mineral-slag binders with a low slag content is disclosed. It is determined that the strength of the entire system directly depends on the strength of the matrix in the interparticle space of the slag grains, i.e., on the amount of diffused binder ions and the quality of the cementing adhesive formed at the particle contacts.

It is established that the hardening of highly filled mineral-slag binders with a low slag content occurs via an ion-diffusion mechanism through the solution, involving mass transfer and cementation of low-activity rock particles by slag hydration products, and of highly active rock particles by more complex products of the combined interaction of slag and rock. The topochemical mechanism of hardening of such binders is completely irrelevant and manifests itself only in the contact zone of slag particles and rock.

Keywords: highly filled mineral slag binders, strength formation, topology, through-mortar hardening mechanism, mass transfer mechanism

Современные представления об образовании твердеющих структур на основе смесей карбонатных пород в соответствии с работами Калашникова В.И. свидетельствуют о том, что при гидратации двухкальциевого C_2S силиката в присутствии карбонатов кальция образуется скоутит $6CaO \cdot SiO_2 \cdot CaCO_3 \cdot nH_2O$. При гидратации же алюмосодержащих минералов в присутствии карбонатов образуется новое гидратное соединение – гидрокарбоалюминат кальция. Гидрокарбоалюминаты срастаются между собой поверхностью шлакового вяжущего и карбонатных микронаполнителей в плотный конгломерат.

Как было экспериментально показано в работах [1-3], образование и развитие твердеющих структур при нормальных условиях в таких системах, как «глина – шлак» и «известняк – шлак», осуществляется даже при низком содержании шлака (10–20 %).

Для доказательства сквозярастворного механизма отвердевания композиционных вяжущих, состоящих из собственно вяжущего вещества и самостоятельно не твердеющего наполнителя, целесообразно рассмотреть топологические модели взаимного размещения частиц компонентов. Для таких моделей в идеализированном виде разработаны расчетные формулы. Частицы принимаются в виде шаров, а их средний размер определяется из известной зависимости между диаметром структурных единиц, удельной поверхностью, плотностью:

$$d = \frac{6}{\rho \cdot S_{уд}}. \quad (1)$$

При этом, если оперировать удельной поверхностью порошков, которые полидисперсны, реальная топологическая структура будет существенно отличаться от идеализированной в связи с влиянием целого ряда структурных факторов, основными из которых являются:

- характер и степень упаковки частиц;
- широкий дисперсионный состав порошков;
- форма и анизотропность частиц;
- наличие в матричном пространстве (бесконечном кластере) кластеров

меньшего порядка.

Таким образом, для выполнения поставленной задачи рассмотрим такие модельные системы, в которых точно известен размер частиц шлака. Для этого возьмем отсев шлака фракции 0,14-0,315 мм, в котором средний размер частиц шлака $d_{ш}=2,28 \times 10^{-4}$ м. В качестве наполнителя при этом используем инертный к действию щелочей наполнитель: известняк и мрамор с долей $CaCO_3$ – 96 % и 99,5 % соответственно, имеющие одинаковую удельную поверхность – 560 м²/кг. Рассмотрим образование твердеющих структур при различных соотношениях шлак – наполнитель при плотностях шлака и наполнителей $\rho_{ш}=2900$ кг/м³, $\rho_{и}=2670$ кг/м³ и $\rho_{м}=2730$ кг/м³.

Согласно зависимости (1), соответственно имеем для частиц известняка $d_{и}=4,01 \times 10^{-6}$ м и для частиц мрамора $d_{м}=3,92 \times 10^{-6}$ м.

Как видно, средний размер частиц шлака почти на два порядка больше среднего размера частиц наполнителей. Нетвердеющей матрицей в виде бесконечного кластера будут упакованные частицы наполнителя известняка или мрамора с дискретно включенными в матрицу частицами шлака.

Определим соотношение ($C_{ш-и}$) количества тонкодисперсного наполнителя и частиц шлака по известному счетному количеству частиц каждого из компонентов:

$$C_{ш-и} = \frac{n_{и}}{n_{ш}}, \quad (2)$$

где $n_{и}$ – количество частиц наполнителя (известняк, мрамор); $n_{ш}$ – количество частиц шлака.

Счетные количества частиц определяются:

$$n_{\text{ш}} = \frac{6 \cdot m_{\text{ш}}}{\pi \rho_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^3}, \quad (3)$$

$$n_{\text{н}} = \frac{6 \cdot m_{\text{н}}}{\pi \rho_{\text{н}} d_{\text{н}}^3}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ш}}$ и $m_{\text{н}}$ – массы шлака и наполнителей в вяжущем в долях единицы; $d_{\text{ш}}$ и $d_{\text{н}}$ – диаметр частиц шлака и наполнителей; $\rho_{\text{ш}}$ и $\rho_{\text{н}}$ – плотность шлака и наполнителей.

Подставив (3) и (4) в (2) и произведя необходимые преобразования, получим:

$$C_{\text{н-ш}} = \frac{m_{\text{н}} \cdot d_{\text{ш}}^3 \cdot \rho_{\text{ш}}}{m_{\text{ш}} \cdot d_{\text{н}}^3 \cdot \rho_{\text{н}}}. \quad (5)$$

Подставляя значения ρ , m и d в (5), получаем результаты, представленные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результат расчета соотношения частиц шлака и наполнителя

Наполнитель	Массовое соотношение шлак : наполнитель по массе	Счетное соотношение количества наполнителя и шлака $C_{\text{н-ш}}$
Известняк	20:80	796884,5
	40:60	298831,7
	60:40	132814,1
Мрамор	30:70	485976,1
	60:40	138850,3

Выберем элементарную кубическую ячейку, имеющую размер грани куба A , а объем куба – A^3 . Будем считать, что в каждой вершине этой ячейки располагается $1/8$ часть шлаковой частицы (в сумме эти части составят одну целую частицу шлака). В свободном объеме ячейки, не заполненной шаровыми секторами шлакового вещества, размещаются частицы наполнителя известняка или глины (рис. 1).

Тогда полный объем элементарной ячейки будет слагаться из одной шлаковой частицы и суммарного объема частиц наполнителя, уложенных с той или иной степенью упаковки $K_{\text{уп}}$. При наиболее плотной гексагональной упаковке $K_{\text{уп}}=0,74$, при наименее плотной кубической упаковке $K_{\text{уп}}=0,52$.

$$V_{\text{я}} = A^3 = \frac{\pi d_{\text{ш}}^3}{6} + \frac{\pi d_{\text{н}}^3}{6} \times \frac{n_{\text{н}}}{K_{\text{уп}}}; \quad (6)$$

так как $n_{\text{н}}=C$, то (6) запишется

$$V_{\text{я}} = A^3 = \frac{\pi d_{\text{ш}}^3}{6} + \frac{\pi d_{\text{н}}^3}{6} \times \frac{C}{K_{\text{уп}}}, \quad (7)$$

откуда

$$A = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \left(d_{\text{ш}}^3 + d_{\text{н}}^3 \times \frac{C}{K_{\text{уп}}} \right)}. \quad (8)$$

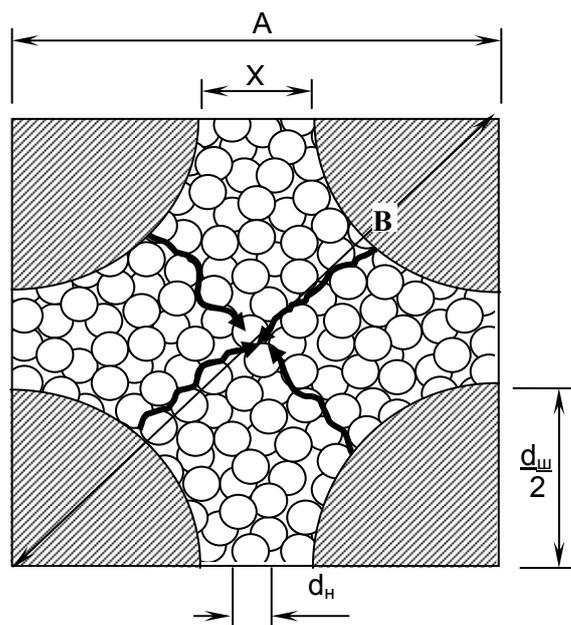


Рис. 1. Идеализованная топологическая схема структуры карбонатно-шлакового и глиношлакового вяжущих

Расстояние X между поверхностями шлаковых частиц по ребру элементарной ячейки будет равно:

$$X = A - d_{ш}. \tag{9}$$

Поскольку длина диагонали B грани кубической ячейки равна $A\sqrt{2}$, а диагональ куба $A\sqrt{3}$, то расстояние между поверхностями частиц шлака Y по диагонали грани составит:

$$Y = A\sqrt{2} - d_{ш}, \tag{10}$$

а расстояние между поверхностями частиц шлака Z по диагонали куба

$$Z = A\sqrt{3} - d_{ш}. \tag{11}$$

Т а б л и ц а 2

Результат расчета геометрических параметров элементарной кубической ячейки

Наполнитель	Соотношение шлак:наполнитель по массе	A , м	X , м	Y , м	Z , м
Известняк	20:80	$3,49 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	$2,12 \times 10^{-4}$	$2,76 \times 10^{-4}$
	40:60	$2,71 \times 10^{-4}$	$4,28 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-4}$
	60:40	$2,31 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-6}$	$6,26 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-4}$
Мрамор	30:70	$3,01 \times 10^{-4}$	$7,19 \times 10^{-5}$	$1,50 \times 10^{-4}$	$2,05 \times 10^{-4}$
	60:40	$2,29 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-6}$	$6,16 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-4}$

Из топологической схемы следует, что для связывания наполнителя продуктами гидратации шлака необходима их миграция в контактные зоны частиц наполнителя (известняк, мрамор). Как видно из рис. 1, наиболее удаленным от поверхности частиц шлака является центр куба. В этом случае транспорт химических продуктов должен осуществляться на далекое расстояние от поверхности шлаковых частиц до частиц в

центре кубической ячейки, равно: для композита с долей известняка 0,8 по массе – $1,38 \cdot 10^{-4}$ м, для композита с долей мрамора 0,7 по массе – $1,02 \cdot 10^{-4}$ м. В такой системе перколяционного кластера из связанных пленочной водой карбонатных частиц протекание осуществляется по наиболее проницаемым тетраэдрическим пустотам к контактным участкам. Прочность композиции определяется прочностью этих контактов. Для склеивания частиц наполнителя необходима миграция продуктов гидратации шлака в контактные зоны частиц. Мигрировать через пористое пространство, заполненное щелочным раствором, могут продукты гидратации шлака в ионной форме. Миграция коллоидных частиц в спрессованных образцах затруднена не только стерическими факторами, но и ограниченным количеством воды в свободном виде.

В таких сложных условиях наиболее вероятным механизмом формирования прочности во времени, безусловно, являются диффузионный перенос ионов вяжущего за счет осмоса и последующая реакция образования новой фазы на поверхности частиц наполнителя преимущественно в зоне их сближения, где молекулярное притяжение максимально, если им является кальцит, не образующий самостоятельно твердеющей структуры в смеси со щелочью.

Непосредственный твердофазный, топохимический механизм твердения внутри матрицы наполнителя невозможен. Именно транспортные химические реакции через раствор являются движущей силой процесса отвердевания самостоятельно не твердеющей матрицы. Топохимический механизм имеет место лишь в локальных зонах расположения частиц шлака. Образование за счет топохимической поверхностной реакции присоединения воды и твердой фазы гидросиликатного геля ограничивается практически контуром пленки адсорбированной воды. В этом случае на идеализированной топологической схеме затвердевшей минерально-шлаковой системы можно выделить очень малые области топохимических реакций формирования прочности и обширные области цементации минеральных частиц матрицы диффундирующими ионами шлакового вещества.

Из схемы (рис. 2) видно, что ответственной за прочность всей системы является прочность матрицы в межчастичном пространстве шлаковых зерен. Если принять самый невыгодный вариант участия минеральных частиц в формировании прочности за счет растворения их и поставки ионов в межчастичное пространство, то прочность матрицы определяется количеством протиффундировавших ионов вяжущего и качеством образовавшегося в контактах частиц цементирующего клея. Такая картина может проявляться при очень низком произведении растворимости вещества частиц минеральной породы и индифферентности последней по отношению к щелочному активизатору. Если частицы матрицы хорошо растворимы в щелочном растворе (опоки, халцедоны и т.п.), то возможна встречная диффузия растворенных веществ матрицы к зерну шлака.

Модельный эксперимент был осуществлен с карбонатно- и мраморно-шлаковым вяжущими при принятых в топологических расчетах составах и дисперсностях компонентов. Для активизации твердения карбонатно-шлаковой композиции применялся едкий натр в количестве 2 % от массы смеси. А для мраморно-шлаковой композиции использовались едкий натр в количестве 2 % и смесь едкого натра и кальцинированной соды по 1 % каждого компонента. Изготовление образцов осуществлялось методом прессования при давлении 15 МПа.

Результаты исследований приведены в табл. 3 и 4.

Также был проведен аналогичный эксперимент на тонкодисперсном шлаке с удельной поверхностью $350 \text{ м}^2/\text{кг}$.

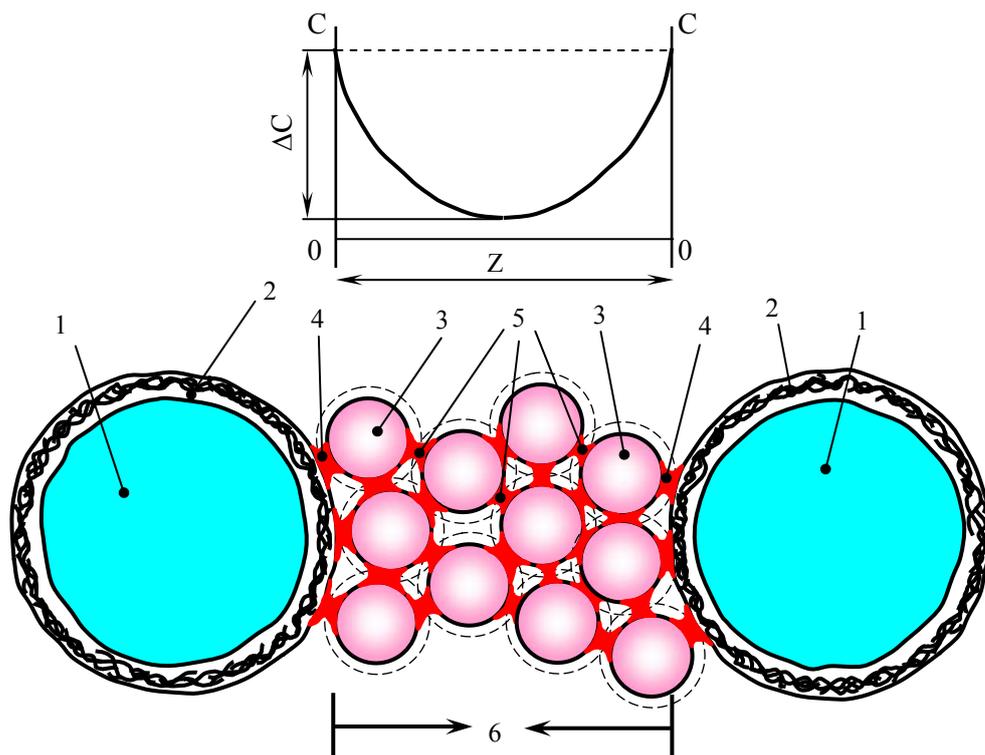


Рис. 2. Цементирование матрицы минерально-шлакового вяжущего закристаллизованными продуктами гидратации шлака при сквозьрастворно-диффузионном механизме твердения: 1 – шлаковое зерно; 2 – гель гидросиликатов кальция, образовавшийся за счет топохимической реакции; 3 – минеральные частицы; 4 – цементация «шлаковым» гелем прилегающих частиц матрицы; 5 – цементация минеральных частиц матрицы между собой в объеме закристаллизованными продуктами гидратации шлака; 6 – направление диффузии гидратированных ионов шлакового вещества; С – концентрация гидратных фаз шлакового вещества в первые минуты твердения композиционного вяжущего

Т а б л и ц а 3

Результаты испытания модельных систем на грубодисперсном шлаке

Наполнитель	Соотношение шлак:наполнитель по массе	Активизатор, %	Прочность при сжатии в контрольные сроки, МПа			
			1 мес.	3 мес.	6 мес.	12 мес.
Известняк	20:80	NaOH 2 %	1,96	3,2	3,9	4,2
	40:60		2,9	5,9	7,2	12,6
	60:40		3,6	6,4	8,93	18,4
Мрамор	30:70	NaOH 2 %	4	5,9	6,5	
	60:40		10	13,2	14,8	
	30:70	NaOH 1 % Na ₂ CO ₃ 1 %	11	16,9	23,5	
	60:40		20	34,6	36,4	
Глауконит	30:70	NaOH 2 %	3	5,8	9,1	
	60:40		8	13,3	16,2	

Результаты испытания модельных систем на тонкодисперсном шлаке

Вид наполнителя	Соотношение наполнитель:шлак	Вид активизатора	Прочность при сжатии через сутки твердения, МПа			Прочность при сжатии после сушки, МПа	Прочность при сжатии после прокаливании, МПа
			3	7	28		
Мрамор	80:20	Щелочь, 2 %	10,8	6,7	18,9	35	35
	40:60		33,7	24,4	46,7	80,6	77,8
	80:20	Сода, 2 %	5,3	15	43,3	61,7	55,6
	40:60		10,6	48	61,6	86,1	86,1
Глауконит	80:20	Щелочь, 2 %	6,5	8,3	11	29,7	36,4
	40:60		24,8	30,0	34,3	49,7	58,1
	80:20	Сода, 2 %	29,4	32,2	37,0	45,4	55,3
	40:60		32,2	38,4	44,4	50,3	65,4

В ы в о д ы :

1. По кинетике твердения, даже в таких сложных условиях удаленности частиц шлака друг от друга (составы с содержанием наполнителя 70-80 %), видно, что наиболее вероятным механизмом формирования прочности матрицы во времени, безусловно, является диффузионный перенос ионов вяжущего за счет разницы концентраций. Последующая реакция конденсации – образования новой фазы на поверхности частиц наполнителя – осуществляется преимущественно в зоне их сближения, где молекулярное притяжение максимально.

2. Именно транспортные химические реакции через раствор есть движущая сила процесса отвердевания самостоятельно не твердеющей матрицы, состоящей из частиц кальцита. Тогда как топохимический механизм отвердевания таких вяжущих совершенно несущественен и проявляется лишь в контактной зоне частиц шлака и горной породы.

Список литературы

1. Викторова, О.Л. Карбонатношлаковые композиционные строительные материалы : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05 / О.Л. Викторова. – Пенза, 1998. – 185 с.
2. Глиношлаковые строительные материалы / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров, В.Л. Хвастунов [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.И. Калашникова. – Пенза : ПГАСА, 2000. – 207 с.: ил.
3. Москвин, Р.Н. Каустифицированные композиционные минеральношлаковые вяжущие и строительные материалы на их основе : дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Р.Н. Москвин. – Пенза, 2005. – 145 с.
4. Москвин, Р.Н. Кинетические особенности нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций, активизированных щелочными компонентами / Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 83–89.
5. Москвин, Р.Н. Особенности процессов каустификации активизаторов в композите и формирования прочности минерально-шлаковых вяжущих / Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 99–104.

References

1. Viktorova, O.L. Carbonate-slag composite building materials : Candidate of Sciences dissertation: 05.23.05 / O.L. Viktorova. – Penza, 1998. – 185 p.
2. Clay-slag building materials / V.I. Kalashnikov, V.Yu. Nesterov, V.L. Khvastunov [et al.] ; Under the general editorship of Doctor of Sciences, Professor V.I. Kalashnikov. – Penza : PGASU, 2000. – 207 p.: ill.
3. Moskvina, R.N. Causticized composite mineral-slag binders and building materials based on them : Candidate of Sciences dissertation : 05.23.05 / R.N. Moskvina. – Penza, 2005. – 145 p.
4. Moskvina, R.N. Kinetic Features of Strength Increase in Carbonate-Slag Composites Activated by Alkaline Components / R.N. Moskvina, E.A. Belyakova // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – No. 1 (62). – P. 83–89.
5. Moskvina, R.N. Features of the Processes of Causticization of Activators in a Composite and Strength Formation of Mineral-Slag Binders/ R.N. Moskvina, E.A. Belyakova // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – No. 2 (63). – P. 99–104.

УДК 691:519.7

DOI 10.54734/20722958_2026_1_67

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,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Языев Сердар Батырович,
доктор технических наук, доцент,
советник РААСН, зав. кафедрой
«Технология строительства
и конструкционные материалы»

*Казанский (Приволжский) федеральный
университет*

Россия, г.Казань, Кремлёвская улица, 18,
корп. 1

Артемьев Дмитрий Александрович,
кандидат архитектуры, доцент кафедры
«Конструктивно-дизайнерское
проектирование»

*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,
Head of the Department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, 6, Miklukho-Maklaya St.

Yazyev Serdar Batyrovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Adviser of the Russian Academy of
Architectural and Construction Sciences,
Head of Department «Construction
Technology and Structural Materials»

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, 18, building 1, Kremlin St.

Artemyev Dmitry Aleksandrovich,
Candidate of Architecture, Associate Professor
of the Department «Structural Design»

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Гарькина, С.Б. Языев, Д.А. Артемьев

Рассмотрено применение риск-ориентированного подхода для оценки качества строительных материалов в условиях современного строительства. Проанализированы традиционные методы контроля качества и выявлены их ограничения. Предложена методология интегрированной оценки рисков, учитывающая вероятность дефектов и потенциальный ущерб от их возникновения. Представлен математический аппарат для количественной оценки рисков с использованием теории вероятностей и методов многокритериального анализа. Приведен практический пример расчета риск-индекса для партии бетонной смеси. Показано, что риск-ориентированный подход позволяет оптимизировать ресурсы контроля качества, сосредоточив внимание на наиболее критичных параметрах и материалах.

Ключевые слова: строительные материалы, контроль качества, оценка соответствия, риск-ориентированный подход, управление рисками, вероятность дефектов, риск-индекс

RISK-BASED APPROACH TO ASSESSING THE QUALITY OF BUILDING MATERIALS

I.A. Garkina, S.B. Yazyev, D.A. Artemyev

This article examines the application of a risk-based approach to assessing the quality of building materials in modern construction. Traditional quality control methods are analyzed and their limitations are identified. A methodology for integrated risk assessment is proposed, taking into account the probability of defects and potential damage from their occurrence. A mathematical

framework for quantitative risk assessment using probability theory and multicriteria analysis methods is presented. A practical example of calculating a risk index for a batch of concrete mix is provided. It is demonstrated that a risk-based approach allows optimization of quality control resources by focusing on the most critical parameters and materials.

Keywords: building materials, quality control, conformity assessment, risk-based approach, risk management, probability of defects, risk index

Обеспечение качества строительных материалов относится к числу приоритетных задач строительной отрасли, поскольку напрямую определяет уровень безопасности зданий и сооружений, их долговечность, эксплуатационную надежность и совокупную стоимость жизненного цикла. Качество материалов выступает системообразующим фактором, влияющим на несущую способность и трещиностойкость конструкций, устойчивость к воздействию агрессивных сред, температурно-влажностных колебаний и циклических нагрузок, на достижение нормативных показателей энергоэффективности и санитарно-экологической безопасности.

Традиционные схемы контроля качества, основанные на сплошных либо выборочных испытаниях по фиксированным регламентам, как правило, ориентированы на подтверждение соответствия единичным требованиям стандартов и технических условий. Однако такие схемы не всегда обеспечивают достаточную чувствительность к вариативности сырья, технологических режимов и условий транспортирования (или хранения), к неоднородности партий и изменчивости параметров в реальном производственном потоке. В результате формально-корректное выполнение предписанных процедур может не сопровождаться адекватной оценкой возникновения дефектов и тяжести их последствий, особенно в случаях, когда отказ материала проявляется на более поздних стадиях (при монтаже или в процессе эксплуатации). Дополнительным ограничением регламентных подходов является их ресурсная затратность: одинаковая интенсивность контроля применяется к материалам и процессам с принципиально различным уровнем критичности, что снижает общую эффективность системы обеспечения качества.

Указанные противоречия усиливаются в условиях усложнения строительных технологий и расширения номенклатуры материалов. В практику активно внедряются композиционные и модифицированные системы (высокопрочные и самоуплотняющиеся бетоны, полимерцементные и геополимерные составы, эффективные теплоизоляционные материалы, многослойные ограждающие конструкции, материалы с вторичными компонентами), обладающие выраженной зависимостью свойств от рецептуры, дисперсного состава, режимов смешения и твердения. Параллельно происходит ужесточение нормативных требований к энергоэффективности, пожарной безопасности, долговечности и экологичности, включая ограничения по эмиссии вредных веществ и требованиям к устойчивости характеристик в течение длительных сроков. В таких условиях возрастает роль неопределенности и необходимость учитывать не только соответствие на момент испытания, но и устойчивость свойств во времени, чувствительность к отклонениям технологических параметров, взаимосвязь материала с конкретными условиями применения в объекте.

В связи с этим актуализируется переход к более адаптивным методам оценки и управления качеством, основанным на принципах риск-ориентированного подхода. Данный подход, широко применяемый в промышленной безопасности, финансовом менеджменте и системах управления качеством, предполагает идентификацию потенциальных несоответствий и причин их возникновения, оценку риска как сочетания вероятности события и тяжести последствий, ранжирование объектов контроля по степени критичности и последующее распределение контрольных ресурсов пропорционально выявленным рискам. В контексте строительных материалов это позволяет:

- дифференцировать глубину и периодичность контроля для различных материалов, поставщиков, партий и производственных линий с учетом их истории стабильности и значимости для надежности конструкций;
- смещать акцент с исключительно «констатирующих» испытаний на предупреждающие меры (мониторинг ключевых параметров процесса, валидация техноло-

гических режимов, статистическое управление процессами и анализ причин отклонений);

– формировать динамические планы контроля, корректируемые по результатам входного, операционного и приемочного контроля, данным рекламаций и результатам эксплуатационного мониторинга;

– обеспечивать более прозрачное обоснование управленческих решений при выборе поставщиков, допуске партий к применению и назначении дополнительных испытаний.

Риск-ориентированный подход представляется перспективным направлением развития системы контроля качества строительных материалов, обеспечивающим повышение достоверности оценки фактической надежности и долговечности, оптимизацию затрат на контроль и испытания, более полное соответствие современным требованиям к безопасности, энергоэффективности и экологической результативности строительной продукции и объектов капитального строительства [1..8].

Действующая система контроля качества строительных материалов характеризуется рядом системных методологических ограничений. Во многих случаях нормативно закреплённые регламенты предусматривают унифицированную интенсивность контрольных процедур для материалов с различной конструктивной и эксплуатационной значимостью, что ведёт к нерациональному распределению трудовых и финансовых ресурсов и снижению общей результативности контроля. При этом традиционный подход преимущественно ориентирован на фиксацию соответствия показателей материалов установленным стандартам и техническим условиям, однако влияние возможных отклонений на надёжность, долговечность, безопасность и функциональные характеристики конечного объекта строительства учитывается недостаточно и, как правило, не получает количественного выражения. Существенным недостатком выступает низкая адаптивность системы: контрольные планы, реализуемые по фиксированным схемам, слабо реагируют на изменение факторов, определяющих вероятность несоответствий, включая репутационные и производственные характеристики поставщика, статистику качества предыдущих поставок, условия транспортировки, складирования и хранения. Дополнительно отмечается ограниченная экономическая обоснованность контрольных мероприятий, выражающаяся в отсутствии формализованной связи между затратами на контроль и ожидаемым экономическим эффектом от предотвращения дефектов, сокращения объёмов переделок, простоев и увеличения затрат на жизненный цикл объекта. В совокупности указанные обстоятельства формируют основную научную проблему, заключающуюся в разработке риск-ориентированной методологии, позволяющей количественно оценивать риски, связанные с качеством строительных материалов (вероятность несоответствий и тяжесть их последствий), и на этой основе оптимизировать состав, глубину и периодичность процедур контроля при заданных ресурсных ограничениях и требуемом уровне надёжности и безопасности.

Концептуальная модель риск-ориентированного подхода. Риск-ориентированный подход к оценке качества строительных материалов опирается на количественную интерпретацию риска как произведения вероятности возникновения несоответствия и тяжести его последствий [9]:

$$R = P \cdot C,$$

где R – интегральный уровень риска; P – вероятность возникновения дефекта (несоответствия установленным требованиям); C – величина потенциального ущерба (тяжесть последствий, выражающая потенциальный ущерб для безопасности, надежности и эксплуатационных характеристик объекта).

В рамках данного подхода приоритеты контроля и объем проверочных мероприятий определяются не одинаково для всех материалов, а дифференцируются в зависимости от величины риска, формируемой сочетанием частоты возможных отклонений и значимости их влияния на результат строительства.

Методология реализуется в виде последовательности взаимосвязанных этапов, обеспечивающих систематическую идентификацию источников риска, их оценивание и последующее формирование рациональной стратегии контроля качества.

На *первом этапе* выполняется идентификация факторов риска, способных влиять на вероятность и последствия несоответствий. К таким факторам относятся ключевые характеристики материала (прочность, долговечность, однородность и стабильность свойств), критичность области применения (например использование в несущих элементах, ограждающих конструкциях, фасадных системах или во внутренних работах), репутация и история поставщика с учетом стабильности качества предыдущих поставок, условия транспортировки и хранения, технологическая сложность и наблюдаемость контролируемых параметров (в том числе доступность инструментальных методов контроля и чувствительность показателей к внешним воздействиям).

На *втором этапе* проводится оценка вероятности возникновения дефектов (P_i). Вероятностная характеристика формируется на основе совокупности источников информации: статистики по результатам предыдущих поставок и выявленных несоответствий; данных входного контроля; сведений, содержащихся в сертификатах и протоколах испытаний производителя; экспертных оценок специалистов при недостаточности или неполноте количественных данных. Использование нескольких источников позволяет повысить достоверность оценки и снизить неопределенность.

Третий этап направлен на определение тяжести последствий (C) при реализации несоответствия. Последствия классифицируются по степени влияния на безопасность и эксплуатационную пригодность:

- *критичные* последствия связаны с риском нарушения безопасности и несущей способности конструкций;
- *значительные* приводят к существенному снижению эксплуатационных характеристик и ресурса;
- *умеренные* проявляются преимущественно в виде дефектов, устранимых без значимого влияния на функциональность (например локальные эстетические нарушения);
- *незначительные* не оказывают влияния на работоспособность и эксплуатационные показатели, ограничиваясь минимальным отклонением от требований.

На *четвертом этапе* находится интегрированная оценка риска R (сопоставление уровней P и C): материал относится к одной из категорий: высокий риск (требует усиленного контроля и расширенной программы испытаний); средний риск (предполагает применение стандартных процедур контроля); низкий риск (допускает оптимизацию (упрощение) контрольных мероприятий при сохранении приемлемого уровня уверенности в качестве).

Пятый этап предусматривает разработку стратегии контроля качества, соотношенной с установленным уровнем риска. Для каждой категории риска обосновываются объем и периодичность испытаний, выбор методов контроля (разрушающих и/или неразрушающих), критерии приемки и решения по партии, дополнительные меры мониторинга (например, усиленный входной контроль, аудит поставщика, контроль условий хранения, расширение перечня показателей или введение промежуточных проверок в процессе применения материала). Таким образом обеспечиваются рациональное распределение контрольных ресурсов и повышение общей надежности системы обеспечения качества строительных материалов.

Вероятностная модель формирования дефектности (несоответствий). Для количественной оценки риска возникновения дефектов в партии материала вводится интегрированная вероятность несоответствия P , определяемая как произведение базовой (априорной) вероятности и корректирующих факторов, отражающих специфические условия цепочки поставок и производства:

$$P = P_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3.$$

Здесь P_0 – базовая вероятность несоответствия для данного типа материала, получаемая из статистики входного контроля, данных рекламаций, результатов испытаний и/или бенчмарков (эталонный показатель: процесс сравнения для оценки качества с

лучшими образцами); K_1 – коэффициент надежности поставщика (типовой диапазон 0,50–2,0), учитывающий зрелость СМК, стабильность процессов и историческую дефектность; K_2 – коэффициент условий транспортировки (типовой диапазон 0,80–1,51), отражающий вероятность деградации качества вследствие нарушений температурно-влажностного режима, ударных нагрузок, сроков и упаковки; K_3 – коэффициент сложности производства партии (типовой диапазон 0,90–1,31), характеризующий технологическую вариативность (сложность рецептуры, число переналадок, доля ручных операций, критичность режимов и т. п.).

Так как произведение факторов может приводить к значениям $P > 1$, на практике рекомендуется явно задавать правило нормировки вероятности, например:

$$P = \min(1, P_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)$$

(удобно использовать, когда коэффициенты K_i близки к 1 (слабые эффекты) и число факторов невелико; чтобы избежать резких скачков P , целесообразно ограничить K_i диапазоном $[0,5; 2]$).

Либо использовать логит-параметризацию (мультипликативные эффекты (факторы) переходят в аддитивные в логарифмических шансах):

$$\log it(P) = \log it(P_0) + \ln K_1 + \ln K_2 + \ln K_3, \log it(P) = \ln \frac{P}{P-1};$$

обратная функция переводит результат обратно в вероятность:

$$P = \sigma \left(\log it(P_0) + \sum_{i=1}^3 K_i \right),$$

где $\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ – сигмоида (логистическая функция).

Вторая форма удобна для калибровки по данным (например логистической регрессией) и для корректного учета неопределенности коэффициентов.

Модель оценки ожидаемого ущерба (стоимостных последствий). Экономические последствия дефектности описываются ожидаемым ущербом C , который целесообразно представлять суммой трех компонент:

$$C = C_{direct} + C_{indirect} + C_{reputation}.$$

Компонента C_{direct} включает прямые, непосредственно наблюдаемые затраты на устранение несоответствия (материала, ремонт или доработка, повторные испытания, дополнительный входной контроль, логистика возврата, списание и утилизация). Компонента $C_{indirect}$ отражает косвенные потери, возникающие вследствие нарушения планов (простой оборудования и персонала, перепланирование производства, срыв графиков поставок, рост незавершенного производства, дополнительные административные затраты на разбор причин и корректирующие действия). Компонента $C_{reputation}$ агрегирует трудноквантифицируемые эффекты снижения доверия к продукции, риски потери клиента, штрафные санкции по SLA и ухудшение условий будущих контрактов; на практике она часто оценивается через сценарный анализ или через приведенную стоимость ожидаемых будущих потерь.

Интегральный риск-индекс качества партии. Для многопараметрической оценки качества (когда существенны несколько характеристик материала, и каждая по-разному влияет на итоговый риск) вводится интегральный риск-индекс R_j (взвешенная агрегация частных рисков):

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_i R_i,$$

где R_i – частный риск по i -му параметру качества (ожидаемая потеря по данному параметру, например: химический состав, гранулометрия, влажность, прочность, чистота, параметры упаковки и т. д.); w_i – весовой коэффициент значимости параметра, отражающий его вклад в технологический результат и последствия отклонения. Для интерпретируемости индекса обычно вводят нормировку весов $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ и требование

$w_i \geq 0$; значения w_i могут определяться экспертно (в частности методом парных сравнений), на основе статистики дефектов (регрессионная оценка влияния параметров на несоответствие) либо комбинированно.

В расширенной постановке частный риск R_i удобно связывать с вероятностно-стоимостной моделью. Например, $R_i = P_i \cdot C_i$ (ожидаемая потеря от отклонения i -го параметра), P_i – вероятность несоответствия по параметру, C_i – ущерб при его нарушении. Тогда R_i становится унифицированной метрикой для принятия решений (допуск партии, углубленный контроль, усиление требований к поставщику, изменение условий транспортировки), базой для оптимизации затрат на контроль и профилактику рисков.

Реализация подхода. Исследуется партия товарного бетона класса В25 объемом 150 м³, поставляемая организацией со средней репутационной надежностью, предназначенная для устройства монолитного перекрытия жилого здания. Для количественной оценки риска несоответствия качества выделены критические показатели: прочность на сжатие, морозостойкость и водонепроницаемость.

На первом этапе задаются исходные вероятности несоответствия по каждому показателю. Для прочности на сжатие принимается базовая вероятность $P_0 = 0,03$ на основании статистики по данному типу бетона. Далее выполняется корректировка с учетом факторов поставки: коэффициент $K_1 = 1,2$ отражает наличие единичных отклонений у поставщика в прошлом, $K_2 = 1,1$ учитывает транспортирование продолжительностью более 1 часа в летний период, $K_3 = 1,0$ соответствует стандартной рецептуре без дополнительных усложняющих условий. Итоговая вероятность несоответствия по прочности определяется:

$$P_1 = P_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 0,03 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = 0,0396.$$

Для морозостойкости и водонепроницаемости аналогично принимаются вероятности $P_2 = 0,02$ и $P_3 = 0,015$ соответственно.

На следующем этапе оценивается стоимость ущерба (тяжесть последствий) при реализации каждого риска с учетом функционального назначения конструкции. Для перекрытия жилого дома недостаточная прочность является наиболее критичным дефектом; совокупный ущерб $C_1 = 1300000$ руб. складывается из прямых затрат на демонтаж и замену (800 000 руб.), косвенных потерь из-за простоя и переноса сроков (300 000 руб.) и репутационных издержек (200 000 руб.). Недостаточная морозостойкость для перекрытия считается менее критичной, поэтому $C_2 = 450000$ руб.; для недостаточной водонепроницаемости принимается $C_3 = 600000$ руб.

Далее рассчитываются частные риски ущерба по каждому показателю:

$$R_1 = P_1 \cdot C_1 = 0,0396 \cdot 1300000 = 51480 \text{ руб.},$$

$$R_2 = P_2 \cdot C_2 = 0,02 \cdot 450000 = 9000 \text{ руб.},$$

$$R_3 = P_3 \cdot C_3 = 0,015 \cdot 600000 = 9000 \text{ руб.}$$

Для агрегирования результатов вводится интегральный риск-индекс R_I (комплексный показатель, позволяющий оценить совокупное воздействие множества рисковых

факторов на объект исследования и ранжировать объекты по степени подверженности рискам), вычисляемый как взвешенная сумма частных рисков. Весовые коэффициенты w_i определены экспертно с учетом влияния показателей на надежность перекрытия: $w_1 = 0,6$ для прочности, $w_2 = 0,2$ для морозостойкости и $w_3 = 0,2$ для водонепроницаемости. Тогда:

$$R_I = w_1 R_1 + w_2 R_2 + w_3 R_3 = 0,6 \cdot 51480 + 0,2 \cdot 9000 + 0,2 \cdot 9000 = 34488 \text{ руб.}$$

Для интерпретации индекса используются пороговые значения:

- при $R_I > 50000$ руб. риск считается высоким и требует усиленного контроля;
- при $20000 < R_I \leq 50000$ руб. – средним, предполагающим стандартную программу контроля с расширением испытаний;

- при $R_I \leq 20000$ руб. – низким, допускающим упрощенный контроль. Полученное значение $R_I = 34488$ руб. соответствует среднему уровню риска (целесообразно применять стандартную схему входного контроля качества с увеличением количества образцов для испытаний на прочность на 50 % относительно минимально установленных нормативными требованиями).

Риск-ориентированный подход к оценке качества строительных материалов формирует методологическую и технологическую основу для модернизации контроля в строительстве за счет концентрации ресурсов на параметрах, определяющих безопасность и надежность конструкций [5]. Перспективы его развития связаны, *во-первых*, с интеграцией в цифровой контур управления качеством: применением предиктивной аналитики и методов машинного обучения для прогнозирования вероятности дефектов по массивам производственных и входных данных; включением риск-показателей в BIM-модели для увязки требований качества с проектными решениями и жизненным циклом объекта; использованием распределенных реестров (блокчейн) для обеспечения прослеживаемости и неизменности записей о качестве по цепочке поставок; внедрением IoT-сенсоров для непрерывного мониторинга условий транспортировки и хранения. *Во-вторых*, подход обеспечивает измеримые экономические эффекты за счет сокращения издержек контроля низкорисковых материалов (ориентировочно на 30–40 %) и уменьшения доли брака (на 15–25 %) при перераспределении ресурсов на критичные характеристики, что позволяет оптимизировать страховые расходы и выстраивать более эффективные модели взаимодействия с надежными поставщиками (включая системы стимулирования); *в-третьих*, нормативное развитие предполагает закрепление риск-ориентированных процедур в актуализируемых версиях СНиП и ГОСТ, в механизмах добровольной сертификации, в программах государственного строительного надзора и в корпоративных стандартах крупных участников рынка. Дальнейшее совершенствование методологии требует формирования отраслевых баз данных по рискам материалов, разработки программных средств автоматизированной оценки, адаптации модели к новым композиционным материалам и согласования с требованиями систем менеджмента качества (в частности ISO 9001).

Выводы:

1. Риск-ориентированный контроль обеспечивает более обоснованное управление качеством по сравнению с равномерными традиционными схемами, так как опирается на количественную оценку риска.

2. Математическая модель, использующая вероятность дефектов и тяжесть последствий, позволяет рассчитывать интегральный риск-индекс и принимать управленческие решения на объективной основе.

3. Дифференциация глубины и частоты контроля по уровню риска повышает эффективность использования ресурсов и снижает потери от несоответствий.

4. Наибольший эффект достигается при контроле критичных материалов для ответственных конструкций, где стоимость ошибки максимальна.

5. Успешное внедрение требует статистических данных, подготовки персонала и специализированного программного обеспечения; дальнейшее развитие связано с расширением номенклатуры материалов и калибровкой моделей на эмпирических данных.

Список литературы

1. Духанина, Е.В. Реализация риск-ориентированного подхода в управлении инвестиционно-строительным процессом / Е.В. Духанина, А.Т. Хаметова // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 2.
2. Фурсов, В.А. Управление рисками при реализации проектов государственно-частного партнерства / В.А. Фурсов, Н.В. Лазарева // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2016. – №1. – С.103–108.
3. Будылина, Е.А. Системный анализ как методология решения проблем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 14–20.
4. Гарькин, И.Н. Нанотехнологии в производстве строительных материалов / И.Н. Гарькин, О.В. Фолимагина, Г.А. Фокин // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 111–112.
5. Гарькина, И.А. Оценка технического состояния объектов культурного наследия: риск-ориентированный подход / И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин, К.М. Арискин // Моделирование и механика конструкций. – 2025. – №22.
6. Гарькин, И.Н. Методика детерминации степени деструкции объектов культурного наследия: системно-структурный анализ / И.Н. Гарькин, В.В. Галишникова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 193–199.
7. Гарькин, И.Н. Вероятностные методы оценки риска разрушения объектов культурного наследия / И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, Л.И. Киямова, И.А. Гарькина, М.А. Чиркина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 5. – С. 27–29.
8. Гарькина, И.А. Оценка технического состояния строительных конструкций: энтропийный подход / И.А. Гарькина, С.Б. Языев, Д.А. Артемьев // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – №4 (65).
9. Данилов, А.М. Управление безопасностью объектов повышенного риска / А.М. Данилов, О.А. Голованов, И.А. Гарькина, Э.В. Лапшин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2007. – Т. 2. – С. 109–112.

References

1. Dukhanina, E.V. Implementation of a Risk-Oriented Approach to Managing the Investment and Construction Process / E.V. Dukhanina, A.T. Khametova // Bulletin of Eurasian Science. – 2023. – Vol. 15. – №2.
2. Fursov, V.A.. Risk Management in the Implementation of Public-Private Partnership Projects / V.A. Fursov, N.V. Lazareva // Bulletin of the North Caucasus Federal University. – 2016. – № 1. – P. 103–108.
3. Budylina, E.A. Systems Analysis as a Problem Solving Methodology / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (55). – P. 14–20.
4. Garkin, I.N. Nanotechnology in the production of building materials / I.N. Garkin, O.V. Folimagina, G.A. Fokin // Regional architecture and engineering. – 2009. – № 1. – P. 111–112.
5. Garkina, I.A. Assessment of the technical condition of cultural heritage sites: a risk-oriented approach / I.A. Garkina, I.N. Garkin, K.M. Ariskin // Modeling and mechanics of structures. – 2025. – № 22.
6. Garkin, I.N. Methodology for determining the degree of destruction of cultural heritage sites: a system-structural analysis / I.N. Garkin, V.V. Galishnikova // Regional architecture and engineering. – 2025. – № 2 (63). – P. 193–199.

7. Garkin, I.N. Probabilistic Methods for Assessing the Risk of Destruction of Cultural Heritage Sites / I.N. Garkin, L.S. Sabitov, L.I. Kiyamova, I.A. Garkina, M.A. Chirkina // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2025. – № 5. – P. 27–29.
8. Gar'kina, I.A. Assessment of the Technical Condition of Building Structures: An Entropy Approach / I.A. Gar'kina, S.B. Yazyev, D.A. Artemyev // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – № 4 (65).
9. Danilov, A.M. Safety Management of High-Risk Facilities / A.M. Danilov, O.A. Golovanov, I.A. Gar'kina, E.V. Lapshin // Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». – 2007. – Vol. 2. – P. 109–112.

УДК [691.544:666.948]:628.588.(06)

DOI 10.54734/20722958_2026_1_76

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

Очкин Игорь Анатольевич,
аспирант
E-mail: ochkin@ogroup.ru

Грейсух Григорий Исаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: grey@pguas.ru

Захаров Олег Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: zoa_pnz@mail.ru

Очкина Наталья Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@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

Ochkin Igor' Anatol'yevich,
Postgraduate student
E-mail: ochkin@ogroup.ru

Greisukh Grigory Isaevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Physics and Chemistry»
E-mail: grey@pguas.ru

Zakharov Oleg Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
«Physics and Chemistry»
E-mail: zoa_pnz@mail.ru

Ochkina Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
«Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

ВЫСОКОПЛОТНЫЕ ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ (СМЕСИ) ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.А. Очкин, Г.И. Грейсух, О.А. Захаров, Н.А. Очкина

Рассмотрены наиболее распространённые материалы и способы их использования для защиты от ионизирующего излучения, используемого в медицинских целях. Представлено сравнение их технико-экономических характеристик. Установлена эффективность применения материалов из вторичного сырья при защите от излучения с энергией квантов от 0,07 до 6 МэВ.

Ключевые слова: радиационная защита, барит, полиминеральный отход производства, высокоглиноземистый цемент, рентгеновское излучение, γ -излучение

HIGH-DENSITY PLASTER MIXES FOR SPECIAL PURPOSES

I.A. Ochkin, G.I. Greisukh, O.A. Zakharov, N.A. Ochkina

This article examines the most common materials and their application for protection against ionizing radiation used for medical purposes. A comparison of their technical and economic characteristics is presented. The effectiveness of radiation-shielding materials made from recycled materials in protecting against radiation with quantum energy from 0.07 to 6 MeV is established.

Keywords: radiation protection, barite, polymineral production waste, high-alumina cement, X-ray radiation, γ -radiation

В современной медицине для диагностики, терапевтического лечения опаснейших заболеваний и стерилизации хирургического оборудования используют различные источники ионизирующих излучений – рентгеновские аппараты, радиоактивные изотопы (например кобальт-60 и цезий-137), линейные ускорители электронов и протонов и др.

Работа с оборудованием, содержащим источники ионизирующих излучений, требует соблюдения строгих норм безопасности для защиты пациентов, обслуживающего персонала и населения.

Согласно стандарту ГОСТ Р МЭК 61859-2001, оборудование для лучевой терапии можно устанавливать в помещениях, удовлетворяющих требованиям СанПиН 2.1.3.1375-03 и другим нормативным документам, определяющим специализированные виды радиационно-защитных строительных материалов, свойства которых регламентируются нормами [1]. Исходя из требований СанПиН, на этапе чистовой отделки рентгеновских кабинетов и других помещений, в которых эксплуатируются источники ионизирующих излучений, рассчитывается уровень дополнительной защиты стационарных средств – стен, потолка, пола, защитных дверей, смотровых окон, ставней и др. Достижение требуемого уровня дополнительной защиты определяется толщиной защитного слоя, которая, в свою очередь, зависит от способности самого материала ослаблять интенсивность излучения. Радиационно-защитные свойства материалов от рентгеновского и гамма-излучения обеспечиваются максимальным содержанием в их матрицах элементов с высокими атомными номерами. Традиционно для решения задач такой защиты используют свинец (в виде листового металла или порошкового наполнителя резин, пластмасс, синтетических смол) и барий (главным образом в виде барита $BaSO_4$), который применяют в качестве наполнителя цементно-баритовой и магнезиально-баритовой рентгенозащитных штукатурок, а также рентгенозащитной облицовочной плитки.

Цементно-баритовые штукатурки изготавливают из портландцемента или шлакопортландцемента высоких марок от М300 и баритового песка с зернами не более 1,25 мм. Для магнезиально-баритовых штукатурок используют магнезиальное вяжущее. Плотность рентгенозащитных растворов на основе барита обычно превышает 2200 кг/м³.

В настоящее время выпускаются сухие рентгенозащитные растворные смеси (Full Mix, Гидроцем Барит, Реал Барит и др.) (табл. 1), а также рентгенозащитная облицовочная плитка, содержащие барит, цемент и специальные добавки в необходимых пропорциях [2].

Т а б л и ц а 1

Технико-экономические характеристики сухих радиационно-защитных цементно-баритовых смесей

Название характеристики	Значения характеристик для смесей разных производителей				
	Реал Барит	Гидроцем Барит	Рунит	Full Mix	Sorel barite M 150
Плотность раствора, кг/м ³	2100±50	2350±50	2650±50	2700±50	2050±50
Жизнеспособность смеси с момента затворения, мин	20-30	60	120	120	20-30
Прочность при сжатии в возрасте: – 24 часа – 28 сут, не менее, МПа	2 10	2 8	2 10	– 17	– 15,8
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут, не менее, МПа	4	4	4	-	3,3
Адгезия к основанию, МПа	1,5	0,3	1,5	0,8	1,5
Цена (25 кг), по данным на сентябрь 2025, руб.	1600	2127	2000	1754	1856

При всем удобстве применения сухих строительных смесей они требуют предельно тщательного и затратного по времени соблюдения поэтапной технологии покрытия: нанесение слоями не более 10-12 мм каждый, просушка (в течение 2-3 суток) и грунтование каждого слоя, а при толщине цементно-баритовой штукатурки более 30 мм – нанесение поверх металлической сетки. Важно при выполнении работ соблюдать определенный температурный режим (15-20°C) и поддерживать в помещении высокую влажность. Готовую штукатурку требуется прикрывать пленкой и беречь от сквозняка и холода в течение 7 суток после нанесения последнего слоя. Поскольку в процессе эксплуатации цементно-баритовая штукатурка склонна к растрескиванию и осыпанию, то для ее защиты следует применять специальный слой толщиной 1-1,5 мм. Для обеспечения полной защиты от радиационного излучения раствор накладывают с обеих сторон. То есть поверхность стен обрабатывается как снаружи помещения, так и изнутри. При устройстве радиационно-защитного слоя на полу помещений цементно-баритовая смесь подлежит обязательному уплотнению поверхностными или глубинными (в зависимости от толщины слоя) вибраторами и в течение 10 дней после каждой укладки должна находиться под слоем полиэтиленовой пленки. Преимуществами более дорогой магнезиально-баритовой штукатурки являются эластичность, устойчивость к сползанию, более высокая адгезия к основанию, быстрое твердение и набор прочности (табл. 2), безусадочность (трещиностойкость). Её нанесение не требует армирования и использования металлических сеток. Кроме того, она имеет более высокие радиационно-защитные характеристики (табл. 3, 4), что дает существенный выигрыш в стоимости, сроках проведения работ и весе строительной конструкции в целом.

Т а б л и ц а 2

Технико-экономические характеристики магнезиально-баритовой сухой штукатурной смеси АЛЬФАПОЛ ШТ-БАРИТ

Плотность раствора, кг/м ³	2900±50
Жизнеспособность смеси с момента затворения, мин	40
Прочность при сжатии в возрасте – 24 часа – 28 сут, не менее, МПа	5 20,3
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут, не менее, МПа	5,1
Адгезия к основанию, МПа	1
Усадка не более, мм/м	0,5
Цена (25 кг), по данным на сентябрь 2025, руб.	2310

Т а б л и ц а 3

Свинцовые эквиваленты баритовой штукатурки на портландцементе

Свинцовый эквивалент	Эквивалентная толщина штукатурки при напряжении на рентгеновской трубке (кВ)			
	75	100	125	150
1 мм	18 мм	20 мм	20 мм	25 мм
2 мм	36 мм	37 мм	38 мм	40 мм
3 мм	60 мм	65 мм	68 мм	68 мм
4 мм	80 мм	90 мм	90 мм	90 мм

П р и м е ч а н и е . Расход сухой смеси на 1 м² при толщине слоя 10 мм составляет 22-22,5 кг.

Свинцовые эквиваленты магнезиально-баритовой штукатурки
АЛЬФАПОЛ ШТ-БАРИТ

Свинцовый эквивалент	Эквивалентная толщина штукатурки при напряжении на рентгеновской трубке (кВ)			
	75	100	125	150
1 мм	9,11 мм	8,01 мм	12,6 мм	17,5 мм
2 мм	15,5 мм	17,5 мм	27,5 мм	39 мм
3 мм	25,3 мм	26,8 мм	42,7 мм	61,5 мм
4 мм	28,7 мм	36,1 мм	58,5 мм	85,3 мм

П р и м е ч а н и е . Расход сухой смеси на 1 м² при толщине слоя 10 мм составляет 19 кг.

(Испытания проведены в ГЦИ СИ ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, протокол испытаний №1/14).

Рентгенозащитные баритовые штукатурки – более дешёвая альтернатива достаточно затратному способу облицовки стен дорогостоящими свинцовыми листами без потери в эксплуатационных свойствах и способности поглощать ионизирующие излучения. Из недостатков этого материала выделяют токсичность, высокую трудоемкость, большую толщину покрытия, что приводит к снижению полезной площади объема помещений, а также высокую подверженность усадочным деформациям и слабую устойчивость к циклическим температурным воздействиям.

Мировые тенденции в практическом решении проблем радиационной защиты ориентированы большей частью на создание радиационно-защитных материалов с железорудными, чугунными, феррофосфорными и другими наполнителями, в меньшей степени – с баритовыми [3-8]. В связи с этим для создания штукатурного раствора, обеспечивающего защиту от излучений, был использован полиминеральный отход производства (ПМО), представляющий собой дробленые и молотые отходы оптического стекла марки ТФ-10 (ТФ – тяжелый флинт) Никольского стекольного завода.

Выбор этой марки стекла обусловлен большим значением плотности (5200 кг/м³), однородностью и высоким содержанием оксида свинца (PbO – 70,9%), а также небольшим значением коэффициента линейного расширения ($8,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и высокой радиационной стойкостью.

Для изготовления штукатурки и облицовочной плитки на основе ПМО в качестве вяжущего применяли глиноземистый цемент (ГЦ-50 ПМЦЗ), отличающийся от портландцемента быстрым набором прочности и повышенным содержанием химически связанной воды. Основные свойства полученных образцов приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Состав растворной смеси на основе ПМО и ГЦ

Наименование компонента	Расход на 1 м ³ раствора, кг	Мас., %
Цемент	408	9,99
Вода	184	4,50
Крупный наполнитель (фр. 2,5-1,25 мм)	2433	59,56
Мелкий наполнитель (фр. 0,315-1,14 мм)	1060	25,95

П р и м е ч а н и е . Теоретическая средняя плотность растворной смеси – 4085 кг/м³.

Т а б л и ц а 6

Основные свойства образцов на основе ПМО и ГЦ

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
1	2	3
Средняя плотность	кг/м ²	3992...4120
Предел прочности при сжатии через 3 сут	МПа	40...54

1	2	3
Предел прочности при изгибе через 3 сут	МПа	5,72...7,72
Адгезионная прочность	МПа	1,2...2,2
Статический модуль упругости	МПа	$(4,11...4,2) \cdot 10^4$
Динамический модуль упругости	МПа	$(4,19...4,39) \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона		0,2...0,23
Усадочные деформации	%	0,036...0,096

Кратность ослабления излучения образцами – плитками толщиной 10 мм (250×250 мм) – определяли как отношение величины абминентной эквивалентной дозы (МЭД), измеренной дозиметром МГК-РМ1203М в геометрии «без защиты», то есть на расстоянии x от источника излучения, равном толщине образца (рис. 1), к величине МЭД, измеренной в геометрии «за защитой», то есть вплотную к поверхности исследуемого образца на одной оси с источником излучения (рис. 2).

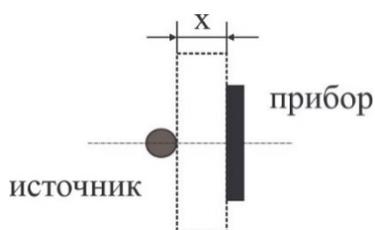


Рис. 1. Геометрия измерения «без защиты»

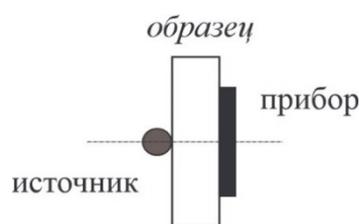


Рис. 2. Геометрия измерения «за защитой»

Для расчета линейного коэффициента ослабления излучения использовали закон ослабления излучения материалом защиты:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I – интенсивность излучения за защитой; I_0 – интенсивность излучения перед защитой; μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см^{-1} ; x – толщина защиты.

Как показал эксперимент (рис. 3), оба состава эффективно ослабляют рентгеновское излучение. При этом линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей и раствора на ПМО (со средней плотностью 4045 кг/м^3) больше, чем у баритового раствора (со средней плотностью 2836 кг/м^3), в среднем в 2,57 раза. С ростом энергии квантов (γ -лучи) радиационно-защитные свойства растворов понижаются, однако остаются вполне приемлемыми для минимизации рисков, связанных с использованием ионизирующего излучения в медицине, требующего защиты различных категорий граждан (персонал, пациенты и население).

Т а б л и ц а 7

Стоимость материалов для отделки 1 м^2 помещения, с одинаковой эффективностью по кратности ослабления излучения, приведенной к цене свинцового эквивалента в 2 мм

Свинец листовой (ГОСТ 9559-89) 1 м^2 , толщина слоя 2 мм	8138 руб.
Штукатурка на основе ПМО и портландцемента 1 м^2 , толщина слоя 14 мм	2730 руб.
Цементно-баритовая штукатурка 1 м^2 , толщина слоя 38 мм	3364 руб.

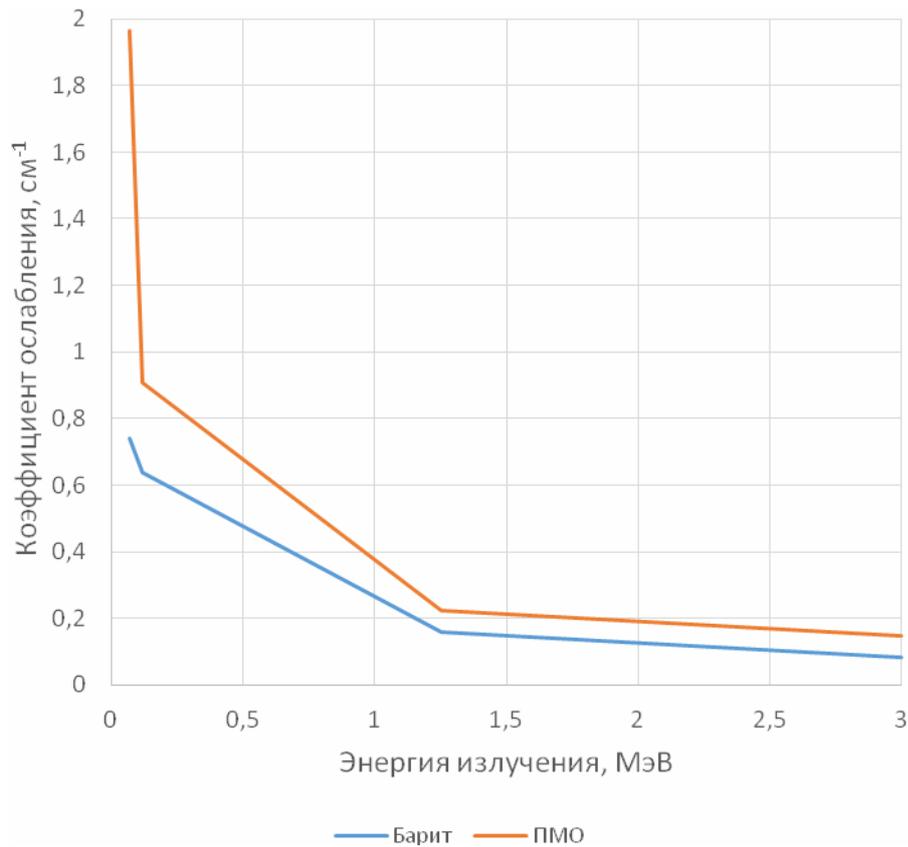


Рис. 3. Влияние вида наполнителя на радиационно-защитные свойства образцов

Расчет стоимости материалов для отделки 1 м² помещения, с одинаковой эффективностью по кратности ослабления излучения, приведенной к цене свинцового эквивалента в 2 мм по ценам на сентябрь 2025 г. (табл. 7) показал, что использование высокоплотных растворов на ПМО для изготовления облицовочной плитки и защитных штукатурок стен рентгеновских кабинетов и кабинетов для эксплуатации линейных ускорителей, применяемых в медицинских учреждениях для лучевой терапии, является более выгодным не только с экономической, но и с практической точки зрения, поскольку позволяет добиться меньшей толщины покрытия; по радиационно-защитным свойствам растворы на ПМО уступают только свинцовому листу.

Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.1192-03. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований: санитарные правила и нормы: утв. главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 14.02.2003: взамен СанПиН 2.6.1.802-99 / Минздрав России, 2003.
2. Грабчиков, С.С. Материалы для защиты от ионизирующих излучений медицинской диагностической аппаратуры / С.С. Грабчиков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XIII научно-технической конференции, 12-14 сентября 2018 г. – Минск : [б. и.], 2018.
3. Fahey Frederic H. Nuclear Medicine and Radiation Protection / Fahey Frederic H., Alison Goodkind, Treves S. Ted, Grant Frederick D. // Journal of Radiology Nursing. – 2016. – Vol. 35, Iss. 1. – P. 1–11.
4. Бондаренко, Ю.М. Конструкционный радиационно-защитный металлокомпозиционный материал на основе алюмосодержащей матрицы и высокодисперсных оксидов тяжелых металлов / Ю.М. Бондаренко, П.В. Матюхин, В.И. Павленко,

Р.Н. Ястребиский // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8182> (дата обращения: 12.10.2025).

5. Королёв, Е.В. Методики и алгоритм синтеза радиационно-защитных материалов нового поколения / Е.В. Королёв, А.П. Самошин, В.А. Смирнов, О.В. Королева, А.Н. Гришина. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 130 с.

6. Гарькина, И.А. Синтез композиционных материалов с позиций классической теории оптимального управления / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Д.С. Сорокин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–7. – С. 1411–1416.

7. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении : монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва : МГСУ, 2012. – 432 с.

8. Королёв, Е.В. Стеклокристаллические материалы для защиты от радиации / Е.В. Королёв, С.И. Егоров, Н.А. Прошина. – Пенза : ПГУАС, 2009.

References

1. SanPiN 2.6.1.1192-03. Hygienic requirements for the design and operation of X-ray rooms, devices and the conduct of X-ray studies: sanitary rules and norms: approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on February 14, 2003 : replacing SanPiN 2.6.1.802-99 / Ministry of Health of the Russian Federation, 2003.

2. Grabchikov, S.S. Materials for protection against ionizing radiation of medical diagnostic equipment / S.S. Grabchikov [et al.] // Modern methods and technologies for the creation and processing of materials: Proceedings of the XIII scientific and technical conference, September 12-14, 2018. – Minsk : [b. i.], 2018.

3. Fahey Frederic H. Nuclear Medicine and Radiation Protection / Fahey Frederic H., Alison Goodkind, Treves S. Ted, Grant Frederick D. // Journal of Radiology Nursing. – 2016. – Vol. 35, Iss. 1. – P. 1–11.

4. Bondarenko, Yu.M. Structural radiation-protective metal-composite material based on an aluminum-containing matrix and highly dispersed heavy metal oxides / Yu.M. Bondarenko, P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebitsky / Modern Problems of Science and Education. – 2013. – No. 1. –URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8182> (date of access: 12.10.2025).

5. Korolev, E.V. Methods and Algorithm for Synthesizing New Generation Radiation-Protective Materials / E.V. Korolev, A.P. Samoshin, V.A. Smirnov, O.V. Koroleva, A.N. Grishina. – Penza : PSUAS, 2009. – 130 p.

6. Gar'kina, I.A. Synthesis of Composite Materials from the Standpoint of Classical Optimal Control Theory / I.A. Gar'kina, A.M. Danilov, D.S. Sorokin // Fundamental Research. – 2014. – No. 9–7. – P. 1411–1416.

7. Bazhenov, Yu.M. System analysis in construction materials science : monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev ; Ministry of Education and Science Ross. Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow. state builds. univ.». – Moscow : MGSU, 2012. – 432 p.

8. Korolev, E.V. Glass-Crystal Materials for Radiation Protection / E.V. Korolev, S.I. Egorov, N.A. Proshina. – Penza : PSUAS, 2009.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 519.62, 539.32, 624.046

DOI 10.54734/20722958_2026_1_83

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4,
тел.: +7 (812) 316-53-11

Калашников Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, член-
корреспондент РААСН, профессор
кафедры «Строительная механика»
E-mail: kalashnikov@vstu.ru

*Волгоградский государственный
технический университет*

Россия, 400066, г. Волгоград,
ул. Академическая, д. 1,
тел.: +7 (8442)-24-80-09

Шведов Евгений Геннадьевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Прикладная математика»
E-mail: esheg@rambler.ru

Машакарян Арарат Сергеевич,
аспирант
E-mail: woozyroll@yandex.ru

*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.,
tel: +7 (812) 316-53-11

Kalashnikov Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Corresponding Member
of RAASN, Professor of the Department
«Construction Mechanics»
E-mail: kalashnikov@vstu.ru

Volgograd State Technical University

Russia, 400066, Volgograd, 1,
Academicheskaya St.,
tel: +7 (8442)-24-80-09

Shvedov Evgeny Gennadievich,
Candidate of Physico-Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department
«Applied Mathematics»
E-mail: esheg@rambler.ru

Mashakaryan Ararat Sergeevich,
Graduate student
E-mail: woozyroll@yandex.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС СЖИМАЕМОГО СТЕРЖНЯ С НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБЬЮ, ПРИБОРЕТАЮЩЕГО ИНДУЦИРОВАННУЮ АНИЗОТРОПИЮ

С.Ю. Калашников, Е.Г. Шведов, А.С. Машакарян

Описаны численные решения о сжатии прямолинейного стального стержня, имеющего начальную кривизну технологического происхождения. Приведены результаты более подробных исследований, касающихся достоверности и обоснованности ранее полученных результатов. Рассмотрены два аспекта проблемы. Во-первых, совпадение результатов при численном интегрировании уравнений изогнутой оси стержня, приобретающего вследствие неоднородности напряженного состояния криволинейную анизотропию, и приближенное интегрирование этого же уравнения вариационным методом. Во-вторых, исследуются совпадение и достоверность результатов при различных шагах нагружения, особенно в начальной стадии.

Используется метод упругих решений, когда за начальное принимается решение с обычными упругими характеристиками. На каждом последующем шаге нагружения упругие постоянные корректируются в соответствии с принятой инкрементально-анизотропной моделью.

Установлено удовлетворительное совпадение численных значений прогибов, полученных различными численными методами с помощью различных программных продуктов, что говорит о достоверности результатов, корректности программного обеспечения и адекватности вычислительной модели. Новые согласующиеся решения свидетельствуют об уточненной оценке устойчивого состояния стержня в сжато-изогнутом состоянии.

Ключевые слова: инкрементальная теория, индуцированная анизотропия, вычислительные модели, напряженно-деформированное состояние

VERIFICATION OF COMPUTATIONAL MODELS FOR DETERMINING THE STRESS-STRAIN STATE OF A COMPRESSIBLE ROD WITH AN INITIAL BEND ACQUIRING INDUCED ANISOTROPY

S.Yu. Kalashnikov., E.G. Shvedov, A.S. Mashakaryan

Numerical solutions for the compression of a rectilinear steel rod having an initial curvature of technological origin are considered. The results of more detailed investigations concerning the reliability and validity of previously obtained results are given. Two aspects of the problem are considered. Firstly, the coincidence of the results in the numerical integration of the equations of the curved axis of a rod acquiring curvilinear anisotropy due to the inhomogeneity of the stress state and the approximate integration of the same equation by the variational method. Secondly, the coincidence and validity of the results at different loading steps, especially in the initial stage, are investigated.

The elastic solution method is used, where a solution with ordinary elastic characteristics is taken as the initial one. At each subsequent loading step, the elastic constants are adjusted according to the adopted incremental-anisotropic model.

A satisfactory coincidence of the numerical values of deflections obtained by different numerical methods using different software products is established, indicating the reliability of the results, the correctness of the software and the adequacy of the computational model. The new consistent solutions indicate a refined assessment of the steady state of the rod in the compression-bent state.

Keywords: incremental theory, induced anisotropy, computational models, stress-strain state

Введение. Современные расчетные модели для расчета элементов строительных конструкций методами строительной механики или теории упругости реализуются в подавляющем большинстве численными методами. Какие-то из них могут быть удачно вписаны в стандартные вычислительные комплексы. Не вписывающиеся же в стандартные модели физических и геометрических вариантов деформирования материала требуют оригинальных авторских программ или модулей для стандартных программных оболочек, тогда возникают вопросы корректного определения напряженно-деформированного состояния рассчитываемых элементов и конструкций. Это, во-первых, вопросы валидации, то есть установления степени соответствия расчетной модели реальному физическому объекту. Такие вопросы появляются при разработке новых моделей деформирования, которые сопровождаются группой физических уравнений, а общая система разрешающих уравнений задачи представляет собой математическую модель. Разрешение этой задачи численными методами представляет собой процесс верификации, то есть установление соответствия между математической моделью и численной моделью. Поскольку решение осуществляется с использованием дискретизации расчетной области, возникает вопрос верификации собственно вычислений, то есть определения точности численного решения и его соответствия математической модели. В этом отношении особо отмечается моделирование сложных физических явлений [1]. Существующие методы верификации программного обеспечения и их классификация приведены в [2].

Отметим, что верификация вычислений позволяет дать оценку качества вычислительной модели в целом, когда выявляются ошибки численного решения или недостатки итерационного процесса, что особенно актуально при расчете строительных конструкций [3].

Ранее авторами предложены и экспериментально проверены с удовлетворительным результатом модель поведения упругого материала и отвечающая ей группа физических уравнений [4], когда считается, что неоднородное распределение напряжений в деформируемом теле вызывает анизотропию физических свойств материала. Анизотропия металлов, являющаяся следствием технологических особенностей изготовления или способов нагружения, получила название наведенной или индуцированной [5-7]. В предложенной модели полагается, что неоднородное напряженное состояние вызывает стеснение деформаций, когда менее напряженные объемы материала «поддерживают» более напряженные, усиливая их сопротивляемость деформированию. Подобное распределение будет отвечать каждой точке тела; следовательно, имеет место локальная трансверсальная изотропия.

Степень неоднородности напряженного состояния в окрестностях рассматриваемой точки характеризуется учетом в соотношениях градиентов тензоров напряжений. Учет приращений искомых величин реализует инкрементальный подход, который в последние десятилетия используется в механике деформируемого тела, для стержневых систем, включая нелинейные задачи устойчивости [8]. В [9-10] модель деформированного тела с индуцированной анизотропией была применена к продольному изгибу сжимаемых стержней. В [11] для идеализированного прямого центрально-сжатого стержня был применен вариационный анализ прогибов с помощью метода Бубнова-Галеркина. В продолжение исследований в [12] с помощью [13] представлено решение задачи продольного сжатия стержня с начальной погибью, где установлено, что значительному нарастанию прогибов отвечает увеличенное значение сжимающей силы по сравнению с эйлеровой. В [14] эта задача реализуется в другом программном продукте. В [15] посредством [16] эта же задача решена методом Бубнова-Галеркина.

Материалы и методы исследования. Рассматривается стержень, сжимаемый силой F , приложенной в центре тяжести прямоугольного поперечного сечения. Линия действия силы проходит через центр опорных шарниров. Вследствие технологических погрешностей изготовления он имеет начальную погибь (рис. 1) в виде полуволны синусоиды, где f_m – наибольшее значение погиби в середине стержня.

$$f_0 = f_m \sin \frac{\pi z}{l}. \quad (1)$$

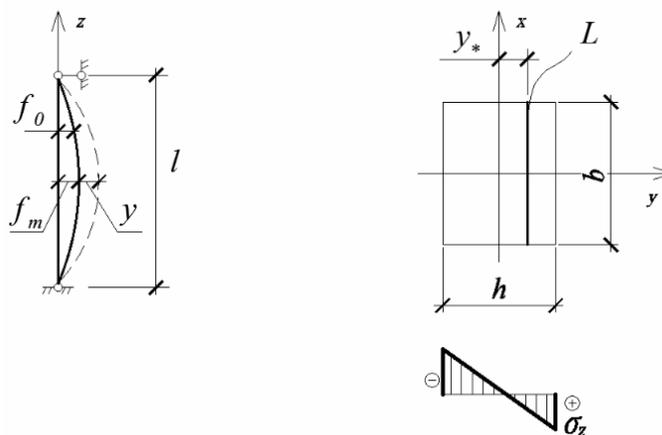


Рис. 1. Расчетная схема сжатого стержня с начальной погибью

Любое увеличение силы придаст кривизне приращение и увеличит перемещение каждой точки по длине стержня на дополнительный прогиб y , а полный прогиб стержня в любом сечении тогда составит:

$$y_{\text{полн}} = y + f_m \sin \frac{\pi z}{l}. \quad (2)$$

Неоднородность напряженного состояния создается по высоте поперечного сечения « h ». В каждом сечении по длине стержня степень неоднородности различна из-за разной величины прогиба; следовательно, создается трансверсальная анизотропия, индуцированная прогибом « y ». Направления осей упругой симметрии и плоскостей изотропии в изогнутом стержне показаны на рис. 2.

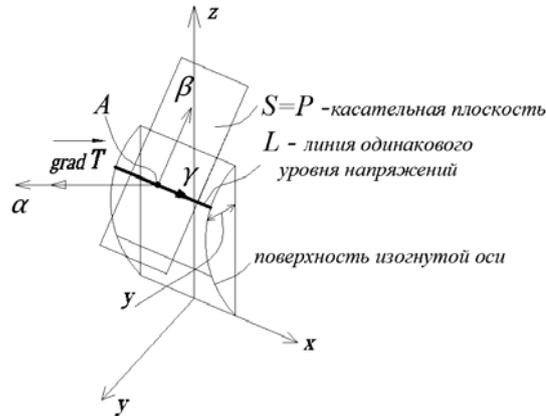


Рис. 2. Положение осей анизотропии при сжатии стержня с начальной погибью

По направлению оси α слои материала спрессованы, значит, модули упругости $E_\beta = E_{gr}$, $E_\alpha = E_0$. В [4] по косвенным экспериментальным данным других исследователей показано, что переменный градиентный модуль упругости может быть описан аналитически с помощью асимптотической функции:

$$E_{gr} = E_0 \frac{\lambda_E + 1,5g}{\lambda_E + g}, \quad (3)$$

где E_0 – модуль Юнга; $\lambda_E = 20,1578 \text{ м}^{-1}$ – некоторая упругая характеристика материала по [4]; g – функция неоднородности напряженного состояния в любом сечении по длине стержня,

$$g = \frac{\text{grad } T}{T} = \frac{12y_{\text{полн}}}{h^2 + 12y_{\text{полн}} \cdot y_*}. \quad (4)$$

Разрешающее неоднородное нелинейное дифференциальное уравнение получим из приближенной зависимости «момент – кривизна», записанной для оси стержня.

$$\left[\frac{a + 1.5 \left(y + f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right)}{a + y + f_m \sin \frac{\pi z}{l}} \right] \cdot E_0 J_x y'' = -F \left(y + f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right). \quad (5)$$

Численное решение уравнения будем производить с помощью синтеза двух широко известных методов: метода переменного параметра упругости и метода последовательных приближений в форме последовательного нагружения возрастающей силой. По известному начальному линейному решению будем последовательно выполнять корректировку упругих характеристик, каждый раз интегрируя разрешающее уравнение (5).

На первом этапе нагружения, принимая минимальным значение силы, выступающей в качестве параметра, будем полагать, что значение дополнительного прогиба $y=0$. В результате решения получим кривую прогибов, которую на втором шаге нагружения будем использовать в первом сомножителе как известную.

Обозначим в (5)

$$Y_i = \frac{a + 1,5y_{i-1} + 1,5y_m \sin \frac{\pi z}{l}}{a + y_{i-1} + y_m \sin \frac{\pi z}{l}}, \quad (6)$$

что приведет к численному уравнению

$$Y_i y'' + \frac{F}{E_0 J_x} y + \frac{F}{E_0 J_x} y_m \sin \frac{\pi z}{l} = 0. \quad (7)$$

На первом шаге нагружения при $i = 1$, $F \rightarrow 0$ примем в (6) $y_0 = 0$, используя Y_1 , получим в результате решения (7) дополнительный прогиб на первом шаге y_1 .

На втором шаге в (6) полагаем $y=y_1$, используем в (7) Y_2 и далее по этапам нагружения Y_i и $y = y_{i-1}$. Нагружение продолжаем до тех пор, пока нарастающие максимальные прогибы не превзойдут нормируемые значения соответствующих технических регламентов или заранее задаваемое предельное значение. Именно этот критерий позволит судить об исчерпании запаса устойчивости.

Вычислялись прогибы по всей высоте стержня. Анализировались наиболее характерные прогибы посередине высоты сжато-изогнутого стержня. Интегрирование дифференциальных уравнений на последовательных шагах нагружения в [12-13] проводилось с помощью авторской программы, реализующей процедуру интерполирования, применяемую не к самой функции, а к её производной, что существенно нивелирует погрешность. Численное интегрирование этих же уравнений по [14] выполнено в авторском программном модуле, работающем под управлением системы Wolfram Mathematica.

Другим подходом по решению нелинейных дифференциальных уравнений является использование вариационных методов. Приближенное решение уравнения (5), удовлетворяющего краевым условиям $y(0) = 0$, $y(l) = 0$, осуществлялось методом Бубнова-Галеркина.

В качестве базисных выбирались простые функции, например парабола:

$$y = C_1 z(l - z), \quad (8)$$

где C_1 – постоянный коэффициент, не равный нулю, а функция y должна удовлетворять краевым условиям при его любом выборе.

Подставив y и y'' по (8) в левую часть уравнения (5), получим невязку:

$$\begin{aligned} R_1(z, C_1) = & C_1^2 \left[3z(z-l) + \frac{F}{E_0 J} z^2 (l-z)^2 \right] - \\ & - C_1 \left\{ 2a + 3f_m \cdot \sin \frac{\pi z}{l} - \frac{F}{E_0 J} \cdot \left[(l-z) \left(az + 2z \cdot f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right) \right] \right\} + \\ & + \frac{F}{E_0 J} f_m \cdot \sin \frac{\pi z}{l} \left(a + f_m \cdot \sin \frac{\pi z}{l} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Условие ортогональности полученной функции R_1 базисной функции необходимо использовать для определения постоянной интегрирования

$$\int_0^l z(l-z) R_1(z, C_1) dz = 0. \quad (10)$$

$$y = C_1 \sin \frac{\pi z}{l} \tag{11}$$

дает невязку

$$R_2(C_1, z) = C_1^2 \sin^2 \frac{\pi z}{l} \left(-1,5 \frac{\pi^2}{l^2} + \frac{F}{E_0 J} \right) - C_1 \sin \frac{\pi z}{l} \left[\frac{\pi^2}{l^2} \left(a + 1,5 f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right) - \frac{F}{E_0 J} \left(a + 2 f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right) \right] + \frac{F}{E_0 J} f_m \sin \frac{\pi z}{l} \left(a + f_m \sin \frac{\pi z}{l} \right) \tag{12}$$

и условие ортогональности

$$\int_0^l R_2(C_1, z) \sin \frac{\pi z}{l} dz = 0. \tag{13}$$

Приближенное интегрирование (10)-(13) выполнено с помощью других авторских программных модулей, а решение этой же задачи представлено в [15-16].

Результаты исследования и их обсуждение. В качестве примера рассмотрен стальной стержень длиной $l=1$ м, размерами $b=0,05$ м; $h=0,02$ м; $i_x=5,77$ мм. Модуль Юнга для строительной стали принят $E_0=210 \cdot 10^6$ кПа, предел текучести $\sigma_0=260$ МПа. Соответствующая эйлерова критическая сила составляет $F_3=68,4$ кН. Нагружение стержня осуществлялось ступенями, начиная с начального значения «0» до $1,4F_3$.

Сосредоточимся при дальнейшем рассмотрении только на оценке достоверности и корректности решения, поэтому будем анализировать лишь значения полученных дополнительных прогибов на шагах последовательного нагружения. Результаты вычислений представлены в табл. 1-3. Отметим, что принятые значения f_m для заданных размеров стержня в соответствии с ГОСТ 103-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой. Сортамент» отвечают разрешаемым нормам заводской кривизны и приняты от исчезающе малой до предельной.

Т а б л и ц а 1

Значения прогибов посередине высоты сжато-изогнутого стержня с начальной погибью $f_m=0,1$ мм

F, кН	F/F ₃	Дополнительный прогиб $u_{доп}$, мм				Классический подход
		По [14]	По [12-13]	По [15-16] синусоида	По [15-16] парабола	
1	2	3	4	5	6	7
5	0,075	0,0079	0,008	0,0074	0,0071	0,0079
10	0,15	0,016	0,016	0,0159	0,0154	0,0171
17,1	0,25	0,030	0,031	0,0305	0,030	0,033
34,2	0,5	0,086	0,087	0,0844	0,082	1,00
51,3	0,75	0,209	0,210	0,1945	0,195	0,30
68,4	1,0	0,470	0,460	0,475	0,51	9,9
70	1,02	0,526	0,510	0,503	0,55	-
85	1,25	1,91	2,0	1,491	2,044	-
90	1,32	2,23	2,1	2,401	4,175	-
95	1,4	160,4	-2,1	4,69	22,97	-

Значения прогибов посредине высоты сжато-изогнутого стержня
с начальной погибью $f_m = 1$ мм

F , кН	F/F_3	Дополнительный прогиб $u_{доп}$, мм				
		По [14]	По [12-13]	По [15-16] синусоида	По [15-16] парабола	Классический подход
1	2	3	4	5	6	7
5	0,075	0,079	0,08	0,06	0,061	0,079
10	0,15	0,126	0,170	0,127	0,129	0,171
17,1	0,25	0,235	0,24	0,237	0,242	0,333
34,2	0,5	0,607	0,62	0,599	0,625	1,0
51,3	0,75	1,24	1,30	1,21	1,30	3,0
68,4	1,0	2,49	2,40	2,46	2,8	99,0
70	1,02	2,59	2,60	2,57	2,95	-
85	1,25	6,15	6,20	6,23	8,85	-
90	1,32	9,32	9,30	9,45	16,9	-
95	1,4	17,3	17,0	17,4	88,3	-

Т а б л и ц а 3

Значения прогибов посредине высоты сжато-изогнутого стержня
с начальной погибью $f_m = 2$ мм

F , кН	F/F_3	Дополнительный прогиб $u_{доп}$, мм				
		По [14]	По [12-13]	По [15-16] синусоида	По [15-16] парабола	Классический подход
1	2	3	4	5	6	7
5	0,075	0,158	0,160	0,113	0,116	0,158
10	0,15	0,237	0,220	0,239	0,246	0,342
17,1	0,25	0,441	0,450	0,443	0,458	0,666
34,2	0,5	1,12	1,10	1,11	1,17	2,0
51,3	0,75	2,27	2,30	2,23	2,42	6,0
68,4	1,0	4,52	4,40	4,49	5,18	198,0
70	1,02	4,76	4,80	4,70	5,45	-
85	1,25	11,0	11,0	11,27	16,1	-
90	1,32	16,5	16,0	17,04	30,8	-
95	1,4	29,7	30,0	31,4	158,5	-

В графах 7 табл.1-3 приведены значения прогибов, полученные по широко известной формуле классического подхода. Затонированные строки графы 7 демонстрируют не только несовпадение, но и принципиальное различие в результатах по сравнению с предложенным подходом в рамках инкрементально-анизотропной модели. Затонированные строки других граф свидетельствуют об отличии какого-то результата более чем на 5 % на каком-либо шаге нагружения (обычно это либо первый, либо последний). Тонировка результатов графы 7 в закритической области нагружения (при $F/F_3 > 1$) свидетельствует о том, что при существенной нагрузке и значительных прогибах параболическая функция наименее удачно описывает искривленную ось стержня. Остальные результаты, представленные в табл. 1-3, демонстрируют удовлетворительное совпадение результатов с достаточной математической точностью. Для стержней с разной степенью начального несовершенства совпадение имеет место независимо от метода реализации и используемого программного обеспечения.

Особое внимание в рамках численной реализации было уделено начальному этапу нагружения, когда сжимающая сила имеет минимальное значение, а соответствующие прогибы незначительны вплоть до исчезающе малых. Это важно в связи с тем, что за

исходное принимается обычное линейное решение, а на шагах нагружения устанавливаются приращения упругих характеристик, отвечающих инкрементальной теории. С помощью компьютерной программы [13] было проверено 4 варианта начальных ступеней деформирования, результаты которых приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Значения прогибов посредине высоты сжато-изогнутого стержня с начальной погибью $f_m = 1$ мм в начальной стадии деформирования

F, кН	F/F ₃	Дополнительный прогиб $u_{доп}$, мм, при различных вариантах начальной силы и ступенях нагружения			
		1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	4-й вариант
1	2	3	4	5	6
0	0	0	-	-	-
5	0,07	-	0,078	-	-
6	0,09	-	-	0,096	-
10	0,15	0,129	0,128	0,120	0,170
15	0,22	-	0,204	-	-
17,1	0,25	0,239	0,237	0,239	0,238
34,2	0,5	0,619	0,619	0,620	0,620

Анализ приведенных результатов показывает, что реализуемый по (6)–(7) алгоритм можно начинать, не решая изначально строгое уравнение (5), а приступать со второго шага подставляя $y_{i-1} = 0$. Заметим, что численный эксперимент, результаты которого представлены в табл. 4, произведен для стержня с нормируемой по ГОСТ 103-2006 для полосового проката погибью $f_m = 1$ мм. При меньших погибях эффект начального нагружения будет еще менее заметен.

Эффект малых возмущений при реализации излагаемой расчетной модели в рамках валидации был проверен при расчете сжатых стоек в составе простых рам, где результаты совпали с расчетом по нормам СП 16.13330 «Стальные конструкции».

Выводы:

1) Анализ представленных в таблицах результатов подтверждает эффективность решения соответствующего уравнения сжатого стержня в изогнутом состоянии. Удовлетворительное совпадение численных значений прогибов, полученных различными численными методами с помощью различных программных продуктов, свидетельствует о достоверности результатов, корректности программного обеспечения и адекватности вычислительной модели.

2) Значение начальной силы не влияет на результаты последующих этапов нагружения, стабилизирующихся после 4-го шага.

3) Особо отметим, что представленная верификация вычислений позволяет дать позитивную оценку качества вычислительной модели в целом, когда выявляются ошибки численного решения или недостатки итерационного процесса.

4) Новые согласующиеся решения свидетельствуют об уточненной оценке устойчивого состояния стержня в сжато-изогнутом состоянии.

Список литературы

1. Сальников, А.В. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов, К.Р. Пятунин, А.С. Никулин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – №9. – С. 100–115.
2. Гурин, Р.Е. Методы верификации программного обеспечения / Р.Е. Гурин, И.В. Рудаков, А.В. Ребриков // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №10. – С. 235–281.
3. Надольский, В.В. Верификация и валидация компьютерной вычислительной модели для проектирования строительных конструкций / В.В. Надольский // Вестник

Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2024. – №2. – С. 42–50.

4. Калашников, С.Ю. Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряжённого состояния: монография / С.Ю. Калашников; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 80 с.

5. Finelli, A. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels / A. Finelli, M. Labanti // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2010. – Iss 13. – P. 24-30.

6. Loginov, Y.N. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel / Y.N. Loginov, M.P. Puzanov // *Chernye Metally*. – 2018. – Iss. 10. – P. 22–27.

7. Осипок, Т.В. Оценка анизотропии механических свойств листового проката из углеродистой стали / Т.В. Осипок, С.А. Зайдес // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – №24(5). – С. 1007–1018.

8. Петров, В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / В.В. Петров. – Москва : Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с.

9. Kalashnikov, S. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / S. Kalashnikov, E. Gurova, R. Kuramshin, B. Yaziev // *International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021)* / eds.: A. Ginzburg, G. Kashevarova. – Springer, Cham, 2022. – P. 95–102.

10. Kalashnikov S., Gurova E., Bandurin N. (2024). Longitudinal Compression of a Rod with Initial deflection Acquiring Induced Anisotropy. In: Klyuev, S.V., Vatin, N.I., Sabitov, L.S. (eds) *Industrial and Civil Construction 2022. ISCICC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 436. Springer, Cham.

11. Kalashnikov S., Gurova E., Shvedov E. (2024). Influence of the Type of Basis Functions in the Bubnov-Galerkin Method in the Deformation Analysis of a Compressed-Curved Rod with Induced Anisotropy. In: Klyuev, S.V., Vatin, N.I., Sabitov, L.S. (eds) *Industrial and Civil Construction 2022. ISCICC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 436. Springer, Cham.

12. Калашников, С.Ю. Продольное сжатие стержня с начальной погибью, приобретающего наведенную анизотропию / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Н.Г. Бандурин // *Строительство и реконструкция*. – 2023. – № 2(106). – С. 25–38.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617224 Российская Федерация. Программа для исследования напряженно-деформированного состояния многопролетных сжато-изогнутых стержней : №2015614339 : заявл. 25.05.2015 : опубл. 03.07.2015 / Н.Г. Бандурин, С.Ю. Калашников, В.В. Жидков, О.Н. Бандурин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (ВолгГАСУ).

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619621 Российская Федерация. Анализ деформированного состояния сжимаемого стержня с начальной погибью при индуцированной анизотропии : заявл. 25.04.2024 : опубл. 25.04.2024 / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Р.Х. Курамшин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

15. Калашников, С.Ю. Вариационный анализ деформирования сжимаемого стержня с начальной погибью при индуцированной анизотропии / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Е.Г. Шведов, А.С. Машакарян // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2024. – Вып. 4(97). – С. 41—55.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660982 Российская Федерация. Анализ критического состояния стержня с начальной погибью при индуцированной анизотропии: № 2023660510 : заявл.

25.05.2023 : опубл. 25.05.2023 / С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова, Р. Х. Курамшин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

References

1. Salnikov, A.V. Verification and validation of computer models / A.V. Salnikov, M.S. Frenchov, K.A. Vinogradov, K.R. Pyatunin, A.S. Nikulin // *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. – 2022. – No. 9. – P. 100–115.
2. Gurin, R.E. Software verification methods / R.E. Gurin, I.V. Rudakov, A.V. Rebrikov // *Mechanical engineering and computer technologies*. – 2015. – No. 10. – P. 235–281.
3. Nadolsky, V.V. Verification and validation of a computer computational model for the design of building structures / V.V. Nadolsky // *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences*. – 2024. – No. 2. – P. 42–50.
4. Kalashnikov, S.Y. Experimental verification of the model of deformation of a material under conditions of an inhomogeneous stress state : monograph / S.Y. Kalashnikov; VolgSTU. – Volgograd, 2017. – 80 p.
5. Finelli, A. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels / A. Finelli, M. Labanti // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2010. – Iss 13. – P. 24–30.
6. Loginov, Y.N. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel / Y.N. Loginov, M.P. Puzanov // *Chernye Metally*. – 2018. – Iss. 10. – P. 22–27.
7. Osipok, T.V. Evaluation of the anisotropy of the mechanical properties of rolled carbon steel / T.V. Osipok, S.A. Zaides // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. – 2020. – №24(5). – P. 1007–1018.
8. Petrov, V.V. Nonlinear incremental structural mechanics / V.V. Petrov. – Moscow : Infra-Engineering, 2014. – 480 p.
9. Kalashnikov, S. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / S. Kalashnikov, E. Gurova, R. Kuramshin, B. Yaziev // *International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021)* / eds.: A. Ginzburg, G. Kashevarova. – Springer, Cham, 2022. – P. 95–102.
10. Kalashnikov S., Gurova E., Bandurin N. (2024). Longitudinal Compression of a Rod with Initial deflection Acquiring Induced Anisotropy. In: Klyuev, S.V., Vatin, N.I., Sabitov, L.S. (eds) *Industrial and Civil Construction 2022. ISCICC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 436. Springer, Cham.
11. Kalashnikov S., Gurova E., Shvedov E. (2024). Influence of the Type of Basis Functions in the Bubnov-Galerkin Method in the Deformation Analysis of a Compressed-Curved Rod with Induced Anisotropy. In: Klyuev, S.V., Vatin, N.I., Sabitov, L.S. (eds) *Industrial and Civil Construction 2022. ISCICC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 436. Springer, Cham.
12. Kalashnikov, S.Y. Longitudinal compression of a rod with an initial axis acquiring induced anisotropy / S.Y. Kalashnikov, E.V. Gurova, N.G. Bandurin // *Construction and reconstruction*. – 2023. – № 2(106). – P. 25–38.
13. Certificate of state registration of the computer program No. 2015617224 Russian Federation. Program for the study of the stress-strain state of multi-span compressed-curved rods : No. 2015614339 : application 05/25/2015 : published 07/03/2015 / N.G. Bandurin, S.Y. Kalashnikov, V.V. Zhidkov, O.N. Bandurina ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering» (To Volggas).
14. Certificate of state registration of the computer program No. 2024619621 Russian Federation. Analysis of the deformed state of a compressible rod with an initial joint with induced anisotropy : application 04/25/2024 : published 04/25/2024 / S.Y. Kalashnikov,

E.V. Gurova, R.H. Kuramshin [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University».

15. Kalashnikov, S.Yu. Variational analysis of deformation of a compressible rod with initial strength under induced anisotropy / S.Yu. Kalashnikov, E.V. Gurova, E.G. Shvedov, A.S. Mashakaryan // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2024. – Issue 4(97). – P. 41–55.

16. Certificate of state registration of the computer program No. 2023660982 Russian Federation. Analysis of the critical condition of a rod with an initial bone in induced anisotropy: No. 2023660510 : application 05/25/2023 : published 05/25/2023 / S.Y. Kalashnikov, E.V. Gurova, R.H. Kuramshin [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University».

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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механика»
E-mail: zaisev.mihail2011@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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Zaitsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department "Mechanics"
E-mail: zaisev.mihail2011@yandex.ru

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ЭТОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.И. Шеин, М.Б. Зайцев

Приведены результаты исследования отклика высотного здания при изменении направления, частоты и продолжительности сейсмического воздействия. Анализируются перемещения характерных точек конечных элементов модели здания с учетом моделирования демпфирования за счет внутреннего трения. Представлена математическая модель каркасно-ствольного высотного здания при нестационарном (сейсмическом) воздействии с использованием программного комплекса, основанного на методе конечных элементов. Динамический отклик конструкции определяется численным решением системы дифференциальных уравнений движения с помощью шагового метода Ньюмарка, реализованного авторами в среде «MatLab» в виде программного комплекса. Разработано программное средство для анализа отклика высотного здания при изменении параметров сейсмического воздействия с учетом демпфирования за счет внутреннего трения. Получены перемещения характерных точек конечных элементов модели здания при различных значениях параметров сейсмического воздействия. Проанализировано влияние демпфирования за счет внутреннего трения на перемещения характерных узлов модели в резонансной зоне.

Ключевые слова: высотное здание, конечный элемент, собственная частота, матрица демпфирования, параметры сейсмического воздействия

HIGH-RISE BUILDING RESPONSE ON SEISMIC IMPACT WHEN VARYING THE PARAMETERS OF ITS ACTION

A.I. Shein, M.B. Zaitsev

The response of a high-rise building to changes in the direction, frequency, and duration of seismic action is being investigated. The movements of the characteristic points of the FE model of the building are analyzed, taking into account the modeling of damping due to internal friction. A mathematical model of a frame-and-trunk high-rise building under non-stationary (seismic) impact using a software package based on the finite element method (FEM) is presented. The dynamic response of the structure is determined by the numerical solution of the system of differential equations of motion using the Newmark step method, implemented by the authors in the MatLab environment in the form of a software package. A software tool has been developed to analyze the response of a high-rise building when changing the parameters of a seismic impact, taking into account damping due to internal friction. The movements of the characteristic points of the FE model of the building at different values of the seismic impact parameters are obtained. The effect of

damping due to internal friction on the movements of characteristic model nodes in the resonant zone is analyzed.

Keywords: high-rise building, finite element, natural frequency, damping matrix, parameters of seismic impact

Введение. Расчет и проектирование высотных зданий, возводимых в сейсмически активных районах, связаны с высокой степенью неопределенности основных расчетных характеристик сейсмического воздействия. Начальный момент землетрясения, его направление, амплитуда, спектральный состав, продолжительность являются в общем случае случайными параметрами.

Анализ уязвимости проектируемых зданий и сооружений исключительно важен для оценки последствий землетрясения, а также для разработки научно обоснованных методов защиты зданий и сооружений от обрушения, таких, как демпфирование, или гашение колебаний [1-3].

С помощью существующих алгоритмов метода конечных элементов (МКЭ) можно провести расчет механических систем любой сложности, учитывая различные особенности поведения конструкций и материалов для совершенствования разрабатываемых математических моделей и расширения класса решаемых задач. В современных задачах сейсмического расчета часто возникает проблема учета собственного демпфирования [4]. Учет внутреннего сопротивления движению здания или сооружения имеет важное значение при расчете систем гашения колебаний, в особенности в резонансной зоне.

Создание корректных динамических моделей является актуальной задачей, решение которой представляется важным фактором расчетного обоснования того или иного конструктивного решения.

Предмет, задачи и методы. Исследовался отклик высотного здания на сейсмическое воздействие при варьировании параметров этого воздействия, таких, как направление, частота и продолжительность сейсмической нагрузки.

Здание прямоугольное в плане (рис. 1, а, б) с размерами – 30×18 м и высотой 150 м (50 этажей).

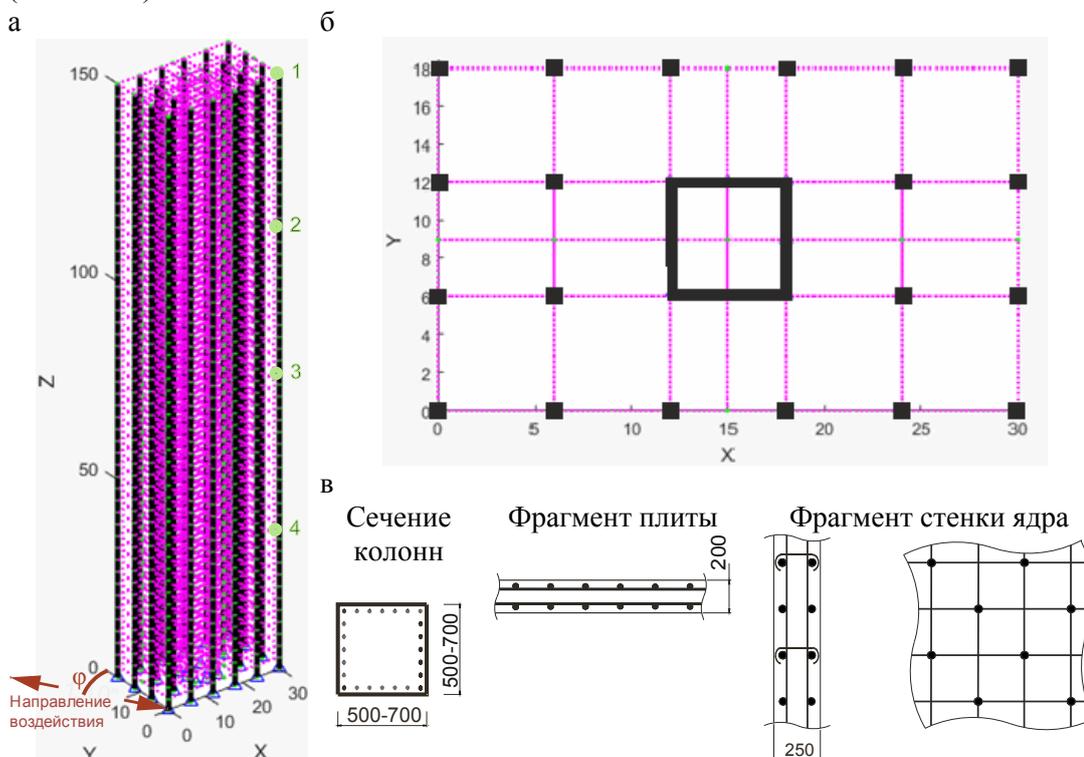


Рис. 1. Конечно-элементная модель высотного здания:
а – конечно-элементная модель; б – схема расстановки колонн и ядра;
в – схемы армирования конструкций

Конструктивная схема здания – каркасно-ствольная, с железобетонным ядром (стволом) жесткости, сечением 6×6 м и толщиной стенки 250 мм. Стенки ядра армированы сетками из стержневой стали Ø12 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

Колонны каркаса сечением 700×700 мм в нижней половине здания и 500×500 мм в верхней армированы рабочей стержневой арматурой Ø32 А400. Шаг стержней – 100 мм.

Монолитные железобетонные плиты перекрытий (покрытия) толщиной 200 мм армированы сетками из стержневой стали Ø10 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

В вертикальных несущих железобетонных конструкциях (колонны и ядро жесткости) принят тяжелый бетон класса В35, в перекрытиях – тяжелый бетон класса В30.

Схемы армирования конструкций здания представлены на рис.1, в.

Сейсмическое воздействие моделировалось акселерограммой землетрясения, представленной на рис. 2.

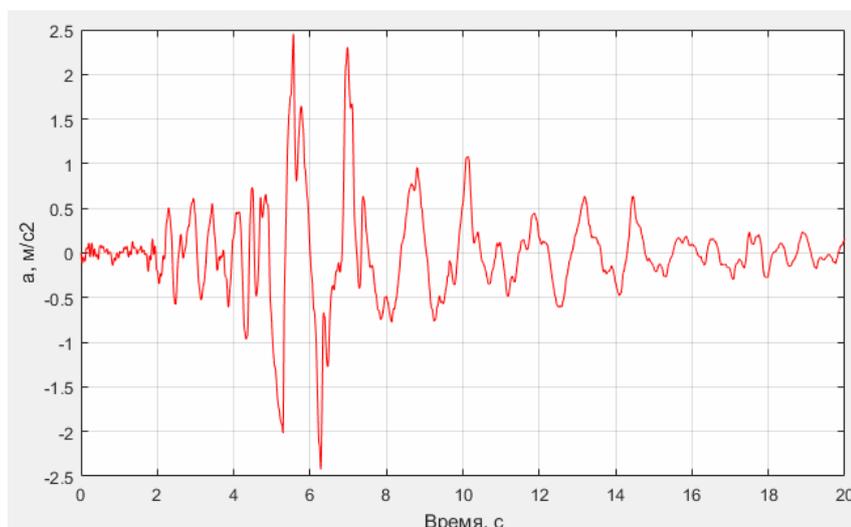


Рис. 2. Акселерограмма землетрясения

Максимальное ускорение – 2,451 м/с² достигается в момент времени $t = 5,56$ с. Максимальная скорость – 0,427 м/с достигается в момент времени $t = 5,35$ с. Максимальное перемещение – 0,116 м достигается в момент времени $t = 12,48$ с. Средняя частота $P_a = 5,604$ рад/с, средний период $T = 1,121$ с.

Для выполнения исследования авторами разработан программный комплекс «Fluctuations» в среде «MatLab», реализующий интегрирование системы дифференциальных уравнений движения пластинчато-стержневой системы в форме МКЭ:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P, \tag{1}$$

где M – диагональная матрица масс; C – матрица демпфирования; K – матрица жесткости конечно-элементной модели пластинчато-стержневой системы; P – вектор сейсмического воздействия.

Стержневой пространственный конечный элемент (КЭ), используемый для расчёта произвольной пространственной пластинчато-стержневой системы, имеет три линейных и три угловых перемещения в узле. Прямоугольный КЭ тонкой пластины имеет одно линейное (перпендикулярное плоскости КЭ) и два угловых (повороты вокруг локальных осей КЭ из его плоскости) перемещения в узле.

Матрица демпфирования C определялась равенством

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K, \tag{2}$$

где α и β – коэффициенты демпфирования, для вычисления которых необходимо найти первые две частоты собственных колебаний исследуемого здания [5]. Частоты были приняты по результатам частотно-векторного анализа, выполненного с помощью

модуля «Frequencies» вышеуказанного программного средства, реализующего решение системы однородных алгебраических уравнений свободных колебаний пластинчато-стержневой системы [6, 7]:

$$|M^{-1}K - \omega^2 E| = 0, \quad (3)$$

где ω – частота собственных колебаний.

Сейсмическое воздействие моделировалось приведением кинематического воздействия к силовому, а ориентация вектора сейсмического воздействия принималась в плоскости OXY в зависимости от угла φ к горизонтальной оси OY глобальной системы координат. Конечно-элементная модель рассматриваемого высотного здания представлена на рис.1, а.

Было исследовано влияние изменения некоторых параметров сейсмического воздействия на перемещения характерных узлов конечно-элементной модели высотного здания.

Результаты исследований и обсуждение

1. *Частотно-векторный анализ.* С помощью разработанного программного средства были получены частоты и формы колебаний здания, характерные перемещения которого на низших частотах представлены на рис. 3.

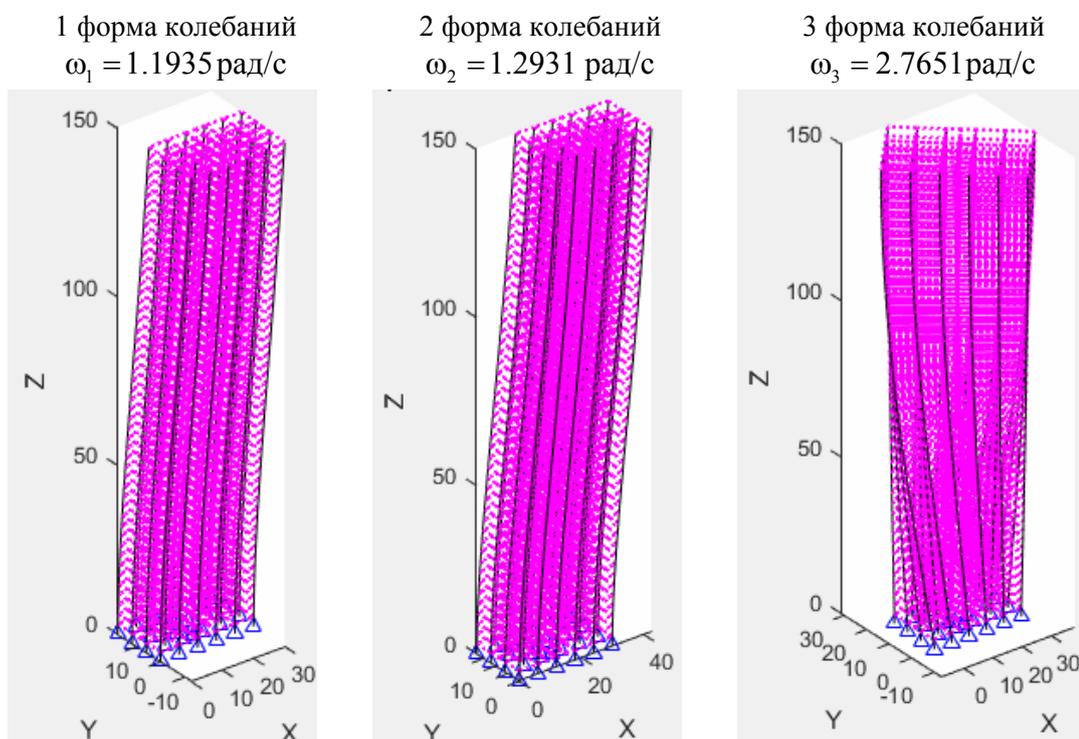


Рис. 3. Формы колебаний здания

2. *Перемещения характерных узлов модели здания при различных направлениях воздействия.* На рис.4-7 представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания с помощью разработанного программного средства, в зависимости от угла направления сейсмического воздействия φ (см. рис. 1, а).

Результаты расчета показывают существенные изменения перемещений вдоль соответствующих осей с увеличением (уменьшением) угла φ , однако крутильных колебаний не наблюдается. При этом колебания конструкции происходят по высшим формам со средней частотой 4–4,5 рад/с.

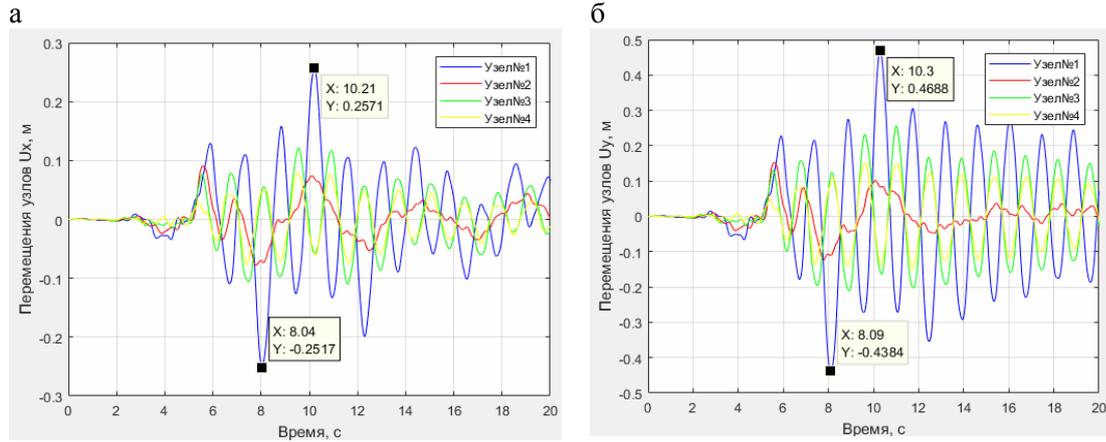


Рис. 4. Перемещения характерных узлов ($\varphi = 30^\circ$):
а – вдоль оси OX ; б – вдоль оси OY

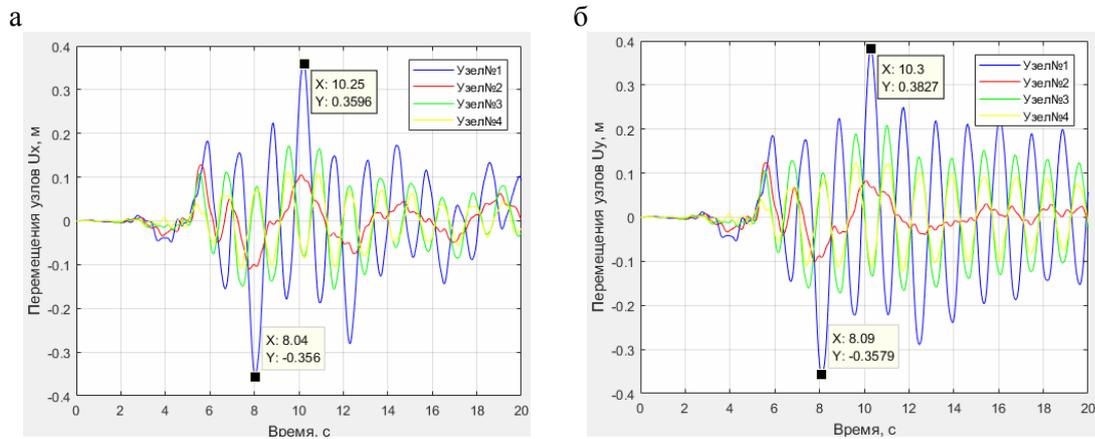


Рис. 5. Перемещения характерных узлов ($\varphi = 45^\circ$):
а – вдоль оси OX ; б – вдоль оси OY

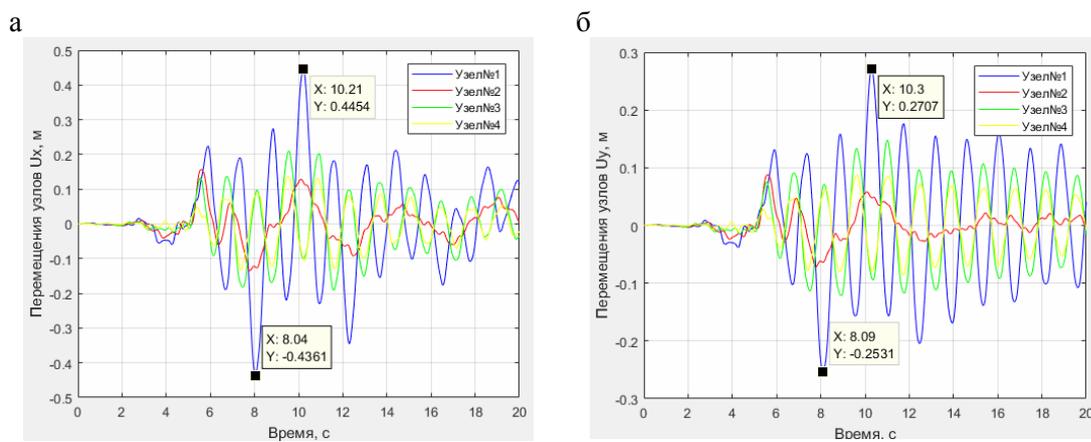


Рис. 6. Перемещения характерных узлов ($\varphi = 60^\circ$):
а – вдоль оси OX ; б – вдоль оси OY

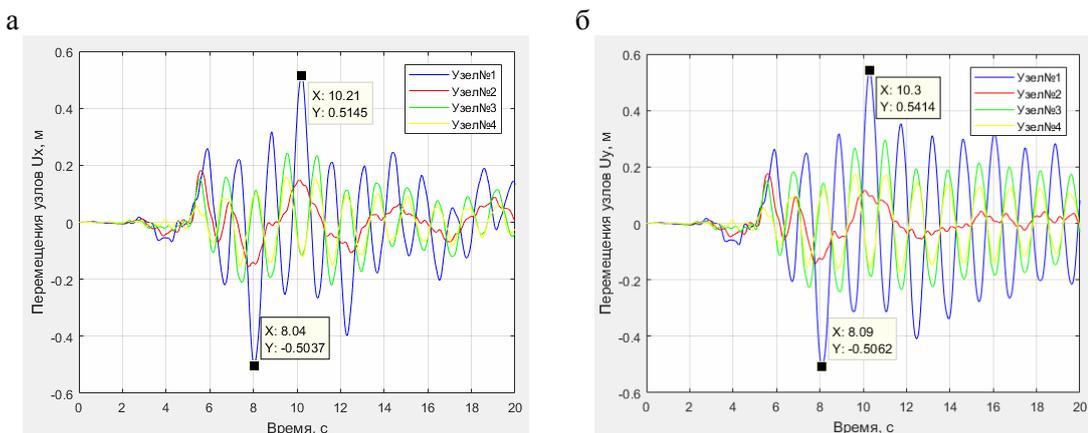


Рис. 7. Перемещения характерных узлов:
 а – вдоль оси OX при $\varphi = 90^\circ$; б – вдоль оси OY при $\varphi = 0^\circ$

3. *Перемещения характерных узлов модели здания при изменении частоты и длительности сейсмического воздействия.* На рис. 8 представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания при увеличении (уменьшении) частоты и длительности сейсмического воздействия. При этом акселерограмма рассматриваемого воздействия (см. рис. 2) была модифицирована таким образом, что величины расчетных ускорений остались неизменными, а длительность воздействия, а следовательно, и частота увеличивались либо уменьшались. Направление воздействия было принято вдоль оси OY ($\varphi = 0^\circ$).

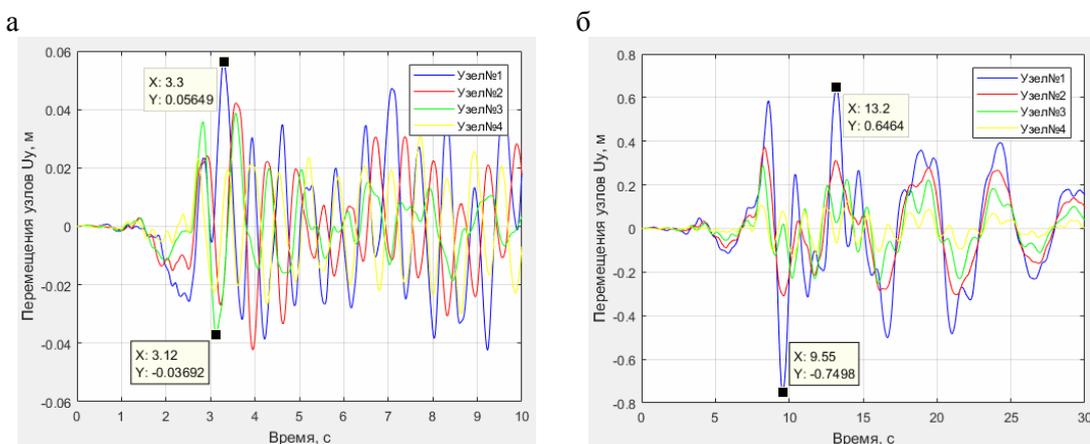


Рис.8. Перемещения характерных узлов при изменении частот:
 а – при увеличении частоты на 50 %; б – при уменьшении частоты на 50 %

На рис. 9 представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания при уменьшении частоты сейсмического воздействия до значения, близкого к резонансной зоне $P = P_a/4 = 1,4$ рад/с. В данном случае частота основного тона колебаний здания $\omega_1 = 1,1935$ рад/с.

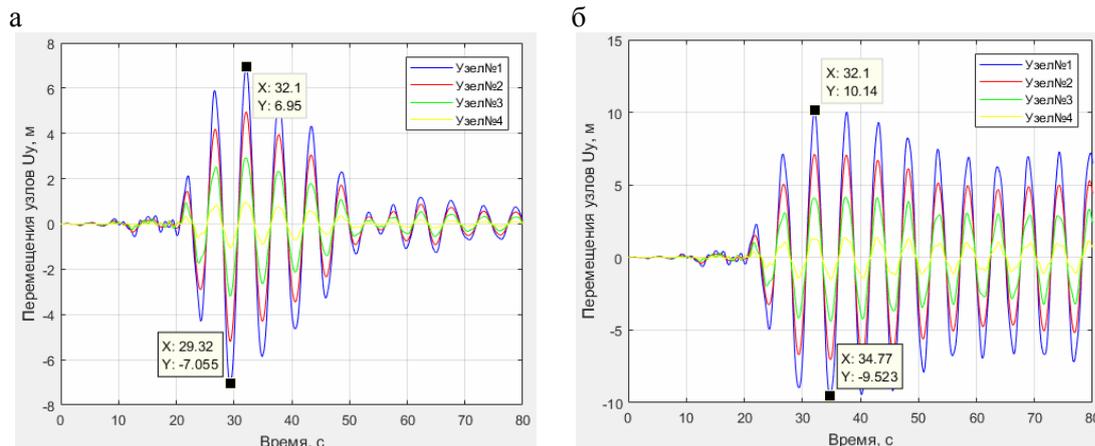


Рис. 9. Перемещения характерных узлов при резонансе:
а – с учетом затухания; б – без учета затухания

Результаты расчета показывают, что при изменении частоты внешнего воздействия в дорезонансной зоне существенного изменения максимальных перемещений не происходит. В резонансной зоне значения максимальных перемещений, полученных с учетом демпфирования, отличаются от этих же значений, вычисленных без учета затухания примерно на 70 %.

Выводы

1. Разработано программное средство в среде «MATLAB», с помощью которого проведено численное исследование отклика высотного здания при изменении параметров сейсмического воздействия.
2. Показано значительное влияние учета демпфирования на напряженно-деформированное состояние конструкции (в частности, для данной задачи значения максимальных перемещений в резонансной зоне, полученные с учетом демпфирования, на 70 % меньше этих же значений, вычисленных без учета затухания).

Список литературы

1. Шеин, А.И. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2023. – № 17. – С. 1–10. – EDN WVLDNQ.
2. Шеин, А.И. Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, М.Б. Зайцев. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_81 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 81–89. – EDN PFZZEO.
3. Damping seismic vibrations in high-rise buildings using controlled reactive dampers / A. Shein, M. Zaitsev, A. Tamrazyan, T. Matseevich. – DOI 10.23968/2500-0055-2025-10-3-86-95 // Architecture and Engineering. – 2025. – Vol. 10, No. 3. – P. 86-95. – EDN SPIQNO.
4. Воробьева, К.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений / К.В. Воробьева, Х.Р. Зайнулабидова, М.В. Фрезе // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 108–118. – EDN VZSANH.
5. Сидоров, В.Н. Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях / В.Н. Сидоров, Е.С. Бадьина, Д.О. Климушкин. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970 // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 6. – С. 960–970. – EDN MYGSCN.
6. Шеин, А.И. Анализ спектральных характеристик высотного здания в среде «MATLAB» / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2024. – № 19. – С. 9–21. – EDN RTTPHO.

7. Шейн, А.И. Частотно-векторный анализ серии однотипных зданий разной этажности / А.И. Шейн, М.Б. Зайцев. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_74 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 74–80. – EDN OSGABC.

References

1. Shein, A.I. Mathematical modeling of the operation of a reactive vibration damper of a cooling tower / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2023. – No. 17. – P. 1–10. – EDN WVLDNQ.

2. Shein, A.I. Three new ways of damping vibrations of buildings and structures / A.I. Shein, A.V. Chumanov, M.B. Zaitsev. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_81 // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 3(60). – P. 81–89. – EDN PFZZEO.

3. Damping seismic vibrations in high-rise buildings using controlled reactive dampers / A. Shein, M. Zaitsev, A. Tamrazyan, T. Matseevich. – DOI 10.23968/2500-0055-2025-10-3-86-95 // Architecture and Engineering. – 2025. – Vol. 10, No. 3. – P. 86–95. – EDN SPIQNO.

4. Vorobyeva, K.V. Consideration of damping in the tasks of assessing the seismic resistance of buildings and structures / K.V. Vorobyeva, H.R. Zainulabidova, M.V. Frese // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences. – 2016. – Vol. 40, No. 1. – P. 108–118. – EDN VZSANH.

5. Sidorov, V.N. Modification of the Rayleigh dissipation function for numerical modeling of internal damping in rod structures / V.N. Sidorov, E.S. Badina, D.O. Klimushkin. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970 // Bulletin of MGSU. – 2024. – Vol. 19, No. 6. – P. 960–970. – EDN MYGSCN.

6. Shein, A.I. Analysis of spectral characteristics of a high-rise building in the MATLAB environment / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2024. – No. 19. – P. 9–21. – EDN RTTPHO.

7. Shein, A.I. Frequency vector analysis of a series of buildings of the same type with different storeys / A.I. Shein, M.B. Zaitsev. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_74 // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 3(60). – P. 74–80. – EDN OSGABC.

УДК 624.04

DOI 10.54734/20722958_2026_1_102

*Тюменский индустриальный университет**Industrial University of Tyumen Architecture and Construction*

Россия, 625000, г. Тюмень,
ул. Володарского, д.38,
тел.:8 (3452) 28-36-70;
факс: 8(3452) 28-36-60

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel.: 8 (3452) 28-36-70;
fax: 8(3452) 28-36-60

Овчинников Илья Игоревич,**Ovchinnikov Ilya Igorevich,**

доктор технических наук, профессор,
зав. базовой кафедрой АО «Мостострой-11»
E-mail: bridgeart@mail.ru

Doctor of Sciences, Professor, Head of the
basic department of JSC «Mostostroy-11»
E-mail: bridgeart@mail.ru

*Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)*

*Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University*

Россия, 125319, Москва, Ленинградский
проспект, 64, тел. 8(499)3460168

Russia 125319, Moscow, Leningradsky
Prospect, 64, tel. 8(499)3460168

*Тюменский индустриальный университет**Industrial University of Tyumen Architecture and Construction*

Россия, 625000, г. Тюмень,
ул. Володарского, д.38,
тел.:8 (3452) 28-36-70;
факс: 8(3452) 28-36-60

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel.: 8 (3452) 28-36-70;
fax: 8(3452) 28-36-60

Валиев Шерали Назаралиевич,**Valiev Sherali Nazaralievich,**

кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Мосты, тоннели и строительные
конструкции»
E-mail: vshn2014@gmail.com

Candidate of Sciences, Head of the
Department «Bridges, tunnels and building
structures»
E-mail: vshn2014@gmail.com

*Уфимский государственный нефтяной
технический университет*

Ufa State Petroleum Technological University

Россия, 450064, Приволжский
федеральный округ,
Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Космонавтов, д. 1,
тел.89033280380

Russia, 450064, Volga Federal District,
Republic of Bashkortostan,
Ufa, 1, Kosmonavtov St.,
tel.: 89033280380

Овчинников Игорь Георгиевич,**Ovchinnikov Igor Georgievich,**

доктор технических наук, профессор
кафедры «Автомобильные дороги, мосты
и транспортные сооружения»
E-mail: bridgesar@mail.ru

Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Highways, Bridges and
Transport Structures»
E-mail: bridgesar@mail.ru

*Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)*

*Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University*

Россия, 125319, Москва, Ленинградский
проспект, 64, тел. 8(499)3460168

Russia 125319, Moscow, Leningradsky
Prospect, 64, tel. 8(499)3460168

Ахмаджанов Мирали Зафар угли,
аспирант

Akhmadjanov Mirali Zafar ugly,
Postgraduate student

E-mail: miralee7@mail.ru

E-mail: miralee7@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МОСТОВОГО ПОЛОТНА АВТОДОРОЖНОГО МОСТА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников, М.З. Ахмаджанов

Рассмотрена задача моделирования поведения пролетного строения автодорожного моста с различными вариантами дорожной одежды на мостовом полотне, загруженного временной нагрузкой А14 и Н14. Моделирование выполнялось с помощью конечно-

элементного программного комплекса «Midas Civil 2022», причем метод конечных элементов применялся в форме модифицированного метода перемещений. Исследовано 5 вариантов дорожной одежды: два с асфальтобетонным покрытием и три с использованием цементобетона. Для всех вариантов определены изгибающие моменты и перемещения от временных нагрузок, а также предельные изгибающие моменты. Произведена оценка грузоподъемности пролетного строения при разных вариантах дорожной одежды. Сделан вывод о том, что дорожная одежда на мостах с использованием цементобетона по своим характеристикам не уступает дорожной одежде из асфальтобетона и даже приводит к увеличению класса грузоподъемности на 26 %. Однако в конце отмечается, что к полученным выводам нужно относиться осторожно и для получения более корректных результатов применять для расчета подход, основанный на использовании нелинейных деформационных моделей материалов.

Ключевые слова: дорожная одежда, мостовое сооружение, цементобетон, асфальтобетон, моделирование, сравнение вариантов

MODELING THE BEHAVIOR OF A HIGHWAY BRIDGE WITH DIFFERENT TYPES OF ROAD PAVEMENTS

I.I. Ovchinnikov, Sh. N. Valiev, I.G. Ovchinnikov M.Z. Akhmadjanov

The article considers the problem of modeling the behavior of the superstructure of a road bridge with different options of road pavement on the bridge deck, loaded with a temporary load of A14 and N14. The modeling was performed using the finite element software package «Midas Civil 2022», and the finite element method was used in the form of a modified displacement method. Five options of road pavement were studied: two using asphalt concrete and three using cement concrete. For all options, bending moments and displacements from temporary loads, as well as ultimate bending moments, were determined. The load-bearing capacity of the superstructure was assessed for different road surface options. The conclusion made that the road surface on bridges with cement concrete is not inferior to characteristics of road surface made of asphalt concrete and even leads to an increase in the load-bearing capacity class by 26 %. However, at the end it is noted that the obtained conclusions should be treated with caution and, in order to obtain more correct results, an approach based on the use of nonlinear deformation models of materials should be used for calculation.

Keywords: road pavement, bridge structure, cement concrete, asphalt concrete, modeling, comparison of options

Введение

Во многих странах для устройства дорожной одежды на мостовых сооружениях используется цементобетонное покрытие. К достоинствам цементобетонных покрытий можно отнести высокую прочность на сжатие и высокое сопротивление износу, потребность в минимальном уходе и ремонте, что приводит к низким эксплуатационным расходам, стойкость к действию суровых погодных условий (воздействие экстремальных температур, агрессивных эксплуатационных сред), хорошее сцепление шин автомобилей с покрытием в мокрых и снежных условиях, эстетичный внешний вид (покрытие можно окрашивать в требуемый цвет).

Цементобетонное покрытие на мостах используется в США, Германии, Японии, Канаде, Китае на многих новых мостах в крупных городах. Причем в качестве покрытия в США применяется либо армированный цементобетон со стальной сеткой с поперечными швами на расстоянии от 9 до 12 м, со стальными штырями в поперечных швах и с анкерными штырями в продольных швах (JRCP – Jointed reinforced concrete pavement), либо непрерывно армированный цементобетон без поперечных швов (CRCP – Continuously reinforced concrete pavement). Во втором случае арматуры больше, чем в первом.

По данным из иностранных источников, долговечность цементобетонного покрытия на мостах превышает долговечность асфальтобетонного покрытия практически в два раза. Для более корректного сопоставления цементобетонной и асфальтобетонной дорожной одежды на мостах был проведен расчетный анализ.

1. Моделирование поведения пролетного строения моста с различными вариантами дорожной одежды на мостовом полотне

Моделирование поведения различных конструкций дорожных одежд выполнялось на примере расчета моста со схемой 14,4+2х23,4+14,4 общей длиной по задним граням устоев 85,35 м, габаритом Г-10,5 (включая 2 полосы движения по 3,5 м и полосы безопасности). Расчетные нагрузки принимались А14 и Н14 (рис. 1).

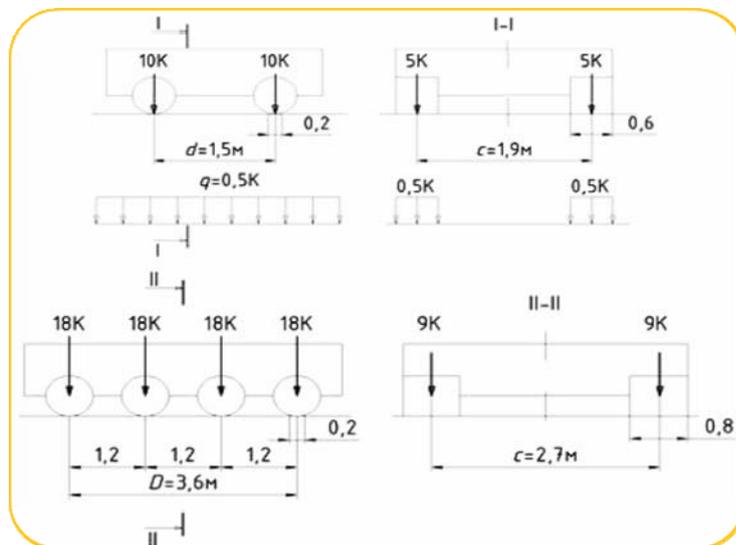


Рис. 1. Схема временных нагрузок АК и НК

Загружение временными нагрузками А14 и Н14 проводилось в соответствии с ОДМ 218.4.026-2016. Пролётные строения представляют собой железобетонные балки, объединённые монолитной железобетонной плитой в температурно-неразрезную цепь. В поперечном сечении температурно-неразрезные пролётные строения состоят из 6 сборных железобетонных балок длиной 15 м и 24 м, размещенных с шагом в осях 2,10 м. Балки двутаврового сечения имеют высоту 1,23 м, с предварительно напрягаемой арматурой (бетон В40 F300 W8 – для пролетов №1 и №4; бетон В45 F300 W8 – для более длинных пролетов №2 и №3), объединяются поверху монолитной железобетонной плитой проезжей части толщиной 180 мм.

Поперечная схема пролетных строений: К1,41+5х2,1+К1,14 м.

Балки пролетного строения опираются на резинометаллические опорные части РОЧ Н 30х40х7,8 см.

Моделирование выполнялось с помощью конечно-элементного программного комплекса «Midas Civil 2022», причем метод конечных элементов использовался в форме модифицированного метода перемещений, в узлах системы которого сходятся различные типовые конечные элементы (плитные, стержневые, объемные и оболочечные), которые имеют разные степени свободы и закрепления.

Главные балки моделировались балочными элементами, плита проезжей части – плитными элементами, конструкция дорожной одежды задавалась в виде нагрузки от давления на плитные элементы.

Для выполнения стадийного расчета составное сечение подгружалось в программный комплекс с помощью калькулятора свойств сечений, при этом принималась следующая стадийность расчета:

- 1) балки пролетного строения с закреплениями;
- 2) нагрузка от давления железобетонной плиты пролетного строения;
- 3) плита пролетного строения – плитные элементы;
- 4) нагрузки от давления каждого слоя дорожной одежды (каждый слой – новая стадия).

Коэффициенты надежности и динамичности для временной нагрузки определялись программным комплексом автоматически. Положение временной нагрузки на

пролетном строении для получения максимальных результатов задавалось через пятна контакта колес автомобилей.

1.1. Варианты устройства дорожных одежд на пролетном строении моста

Рассматривалось 5 вариантов устройства дорожной одежды на пролетном строении моста. Вариант 1 приведен на рис. 2. На пролетном строении из 6 балок располагается плита проезжей части толщиной 18 см из бетона класса В30. Ширина проезжей части 12,6 м, суммарная толщина дорожной одежды 16,5 см.

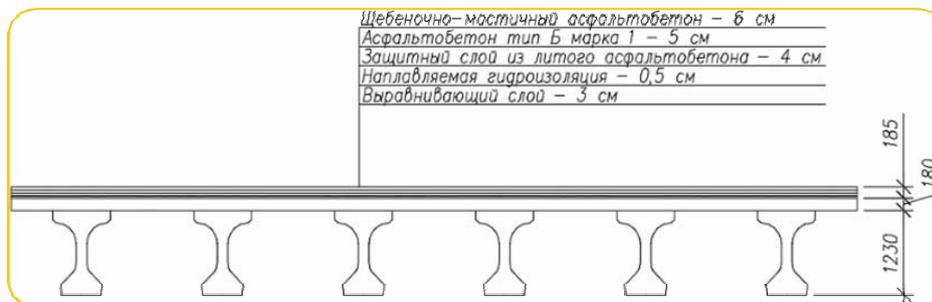


Рис. 2. Конструкция дорожной одежды по варианту 1

Характеристики материала слоев дорожной одежды по варианту 1 приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики материала слоев и постоянной нагрузки от них

№ п/п	Наименование нагрузки				Норм. знач. q_n , кН/м	γ_f	Расч. знач. q_p , кН/м
	H, м	γ , кН/м ³	B, м	L, м			
1	Щебеночно-мастичный асфальтобетон				1,38	1,5	2,07
	0,06	23,00	1,00	1,00			
2	Асфальтобетон, тип Б, марка 1				1,15	1,5	1,725
	0,05	23,00	1,00	1,00			
3	Защитный слой из литого асфальтобетона				0,92	1,2	1,104
	0,04	23,00	1,00	1,00			
4	Наплавляемая гидроизоляция				0,075	1,3	0,0975
	0,005	15,00	1,00	1,00			
5	Выравнивающий слой				0,72	1,3	0,936
	0,03	24,00	1,00	1,00			

Вариант 2 представлен на рис.3. На пролетном строении из 6 балок располагается плита проезжей части толщиной 18 см из бетона класса В30. Толщина дорожной одежды 12,5 см.

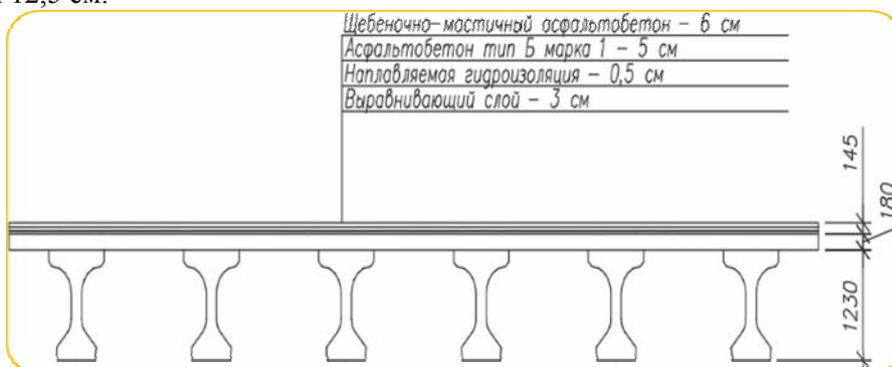


Рис. 3. Конструкция дорожной одежды по варианту 2

Характеристики материала слоев дорожной одежды по варианту 2 приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Характеристики материала слоев и постоянной нагрузки от них

№ п/п	Наименование нагрузки				Норм. знач. q_n , кН/м	γ_f	Расч. знач. q_p , кН/м
	H, м	γ , кН/м ³	B, м	L, м			
1	Щебеночно-мастичный асфальтобетон				1,38	1,5	2,07
	0,06	23,00	1,00	1,00			
2	Асфальтобетон, тип Б, марка 1				1,15	1,5	1,725
	0,05	23,00	1,00	1,00			
3	Наплавляемая гидроизоляция				0,075	1,3	0,0975
	0,005	15,00	1,00	1,00			
4	Выравнивающий слой				0,72	1,3	0,936
	0,03	24,00	1,00	1,00			

Вариант 3 показан на рис. 4. Пролетное строение состоит из 6 балок, на которых располагается плита проезжей части толщиной 18 см из бетона класса В30, на которой устроена дорожная одежда из цементобетона толщиной 11 см.

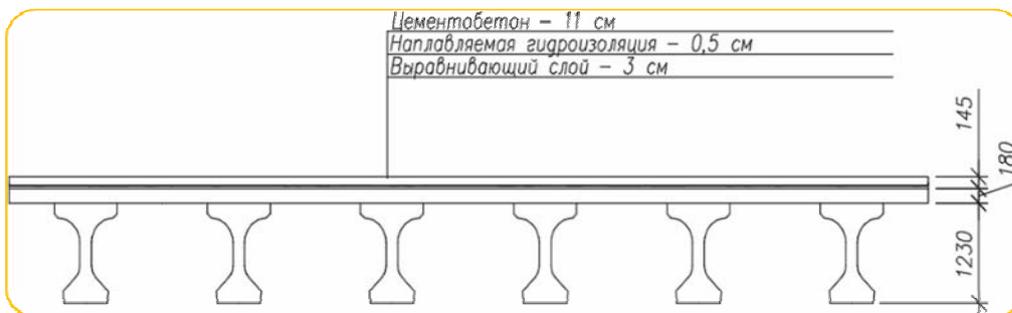


Рисунок 4. Конструкция дорожной одежды по варианту 3

Характеристики материала слоев дорожной одежды по варианту 3 приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Характеристики материала слоев и постоянной нагрузки от них

№ п/п	Наименование нагрузки				Норм. знач. q_n , кН/м	γ_f	Расч. знач. q_p , кН/м
	H, м	γ , кН/м ³	B, м	L, м			
1	Цементобетон				2,64	1,5	3,96
	0,11	24,00	1,0	1,00			
2	Наплавляемая гидроизоляция				0,075	1,3	1,13
	0,005	15,00	1,0	1,00			
3	Выравнивающий слой				0,72	1,3	0,936

Вариант 4 представлен на рис. 5. Пролетное строение состоит из 6 балок, на которых располагается плита проезжей части толщиной 18 см из бетона класса В30, на которой устроена дорожная одежда из цементобетона толщиной 6 см.

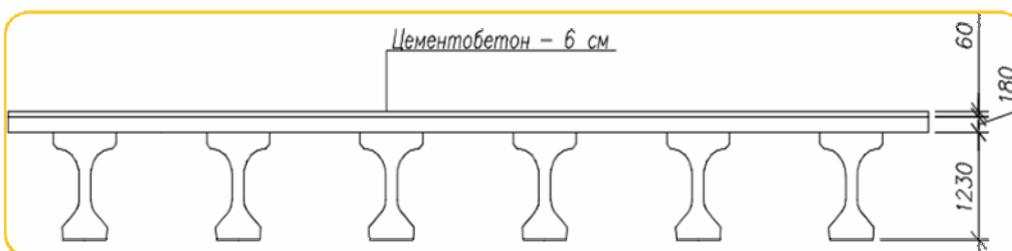


Рис. 5. Конструкция дорожной одежды по варианту 4

Характеристики материала слоев дорожной одежды по варианту 4 приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Характеристики материала слоев и постоянной нагрузки от них

№ п/п	Наименование нагрузки				Норм. знач. q_n , кН/м	γ_f	Расч. знач. q_p , кН/м
	H, м	γ , кН/м ³	B, м	L, м			
1	Цементобетон				1,50	1,5	2,25

Вариант 5 показан на рис. 6. Пролетное строение состоит из 6 балок, на которых располагается плита проезжей части толщиной 18 см из бетона класса В30, на которой устроена дорожная одежда из цементобетона толщиной 9 см.

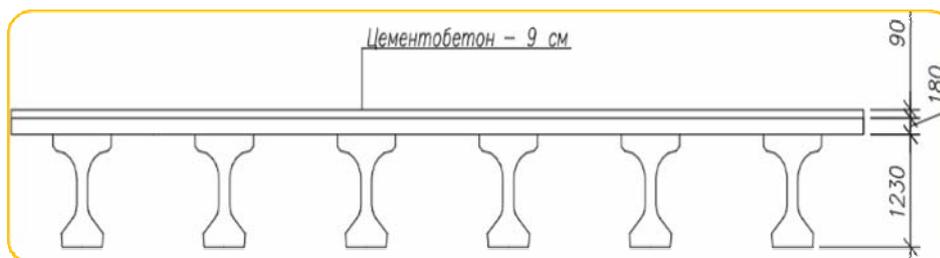


Рис. 6. Конструкция дорожной одежды по варианту 5

Характеристики материала слоев дорожной одежды по варианту 5 приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5.

Характеристики материала слоев и постоянной нагрузки от них

№ п/п	Наименование нагрузки				Норм. знач. q_n , кН/м	γ_f	Расч. знач. q_p , кН/м
	H, м	γ , кН/м ³	B, м	L, м			
1	Цементобетон				2,25	1,5	3,375
	0,09	25,00	1,0	1,00			

2. Сопоставительный анализ результатов моделирования пролетного строения с разными вариантами дорожной одежды

С использованием программного комплекса «Midas Civil 2022» было проведено исследование сходимости расчетной методики при увеличении количества конечных элементов, а затем выполнено численное моделирование поведения пролетного строения при различных вариантах дорожной одежды. При этом определялись изгибающие моменты и перемещения от действия постоянных нагрузок.

Результаты расчета для разных вариантов дорожной одежды приведены в табл. 6–10.

Т а б л и ц а 6

Результаты расчета для первого варианта дорожной одежды

Стадии	Изгибающие моменты от постоянной нагрузки, кН·м	Перемещения от постоянной нагрузки, мм
Балки	826,11	14,05
Балки и нагрузка от плиты проезжей части	1472,91	25,00
Балки с плитой проезжей части	1462,38	24,92
Выравнивающий слой	1577,86	25,90
Гидроизоляция	1589,90	26,00
Защитный слой	1726,14	27,15
Асфальтобетон, тип Б, марка 1	1941,23	28,88
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	2196,60	31,03

Результаты расчета для второго варианта дорожной одежды

Стадии	Изгибающие моменты от постоянной нагрузки, кН·м	Перемещения от постоянной нагрузки, мм
Балки	826,11	14,05
Балки и нагрузка от плиты проезжей части	1472,91	25,00
Балки с плитой проезжей части	1462,38	24,92
Выравнивающий слой	1577,86	25,90
Гидроизоляция	1589,90	26,00
Асфальтобетон, тип Б, марка 1	1802,78	27,80
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	2058,24	29,97

Результаты расчета для третьего варианта дорожной одежды

Стадии	Изгибающие моменты от постоянной нагрузки, кН·м	Перемещения от постоянной нагрузки, мм
Балки	826,11	14,05
Балки и нагрузка от плиты проезжей части	1472,91	25,00
Балки с плитой проезжей части	1462,38	24,92
Выравнивающий слой	1577,86	25,90
Гидроизоляция	1589,32	25,99
Цементобетон	2075,65	30,12

Результаты расчета для четвертого варианта дорожной одежды (фиброцементобетон толщиной 6 см)

Стадии	Изгибающие моменты от постоянной нагрузки, кН·м	Перемещения от постоянной нагрузки, мм
Балки	826,11	14,05
Балки и нагрузка от плиты проезжей части	1466,79	25,00
Балки с плитой проезжей части	1462,38	24,92
Фиброцементобетон (6 см)	1694,75	27,06

Результаты расчета для четвертого варианта дорожной одежды (фиброцементобетон толщиной 9 см)

Стадии	Изгибающие моменты от постоянной нагрузки, кН·м	Перемещения от постоянной нагрузки, мм
Балки	826,11	14,05
Балки и нагрузка от плиты проезжей части	1466,79	25,00
Балки с плитой проезжей части	1462,38	24,92
Фиброцементобетон (9 см)	1815,66	28,05

По рис. 7 и 8 можно провести сравнение величин различных факторов для рассмотренных вариантов дорожной одежды.



Рис. 7. Величины изгибающих моментов от постоянных нагрузок для разных вариантов дорожной одежды



Рис. 8. Величины перемещений от постоянных нагрузок для разных вариантов дорожной одежды

В табл. 11 представлены результаты расчетов предельного изгибающего момента и изгибающих моментов от нагрузок А14 и Н14 для разных вариантов дорожной одежды на пролетном строении.

Т а б л и ц а 11

Сопоставление величин разных изгибающих моментов

№ варианта	Предельный изгибающий момент, кН·м	Изгибающий момент от нагрузки А14, кН·м	Изгибающий момент от нагрузки Н14, кН·м
1	6158,221	2239,47	1225,89
2	6158,221	2239,47	1225,89
3	6158,221	2239,47	1225,89
4	6780,212	2239,47	1225,89
5	6908,205	2239,47	1225,89

На рис. 9 приведены величины предельных изгибающих моментов, а на рис. 10 – величины перемещений для рассмотренных вариантов дорожных одежд.

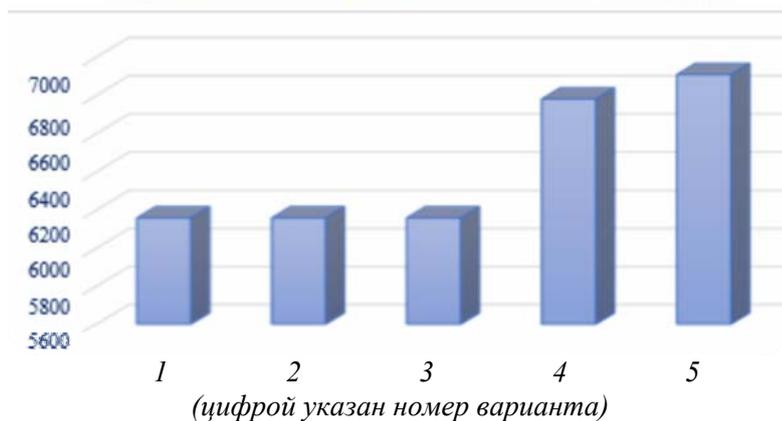
Предельный изгибающий момент, кНм

Рис. 9. Величины предельных изгибающих моментов для пролетных строений с разными вариантами дорожной одежды

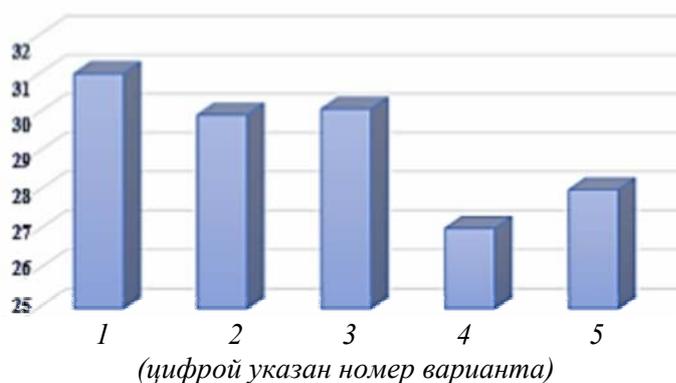
Перемещения от постоянных нагрузок, мм

Рис. 10. Величины наибольших перемещений для пролетных строений с разными вариантами дорожной одежды

3. Расчетная оценка грузоподъемности пролетного строения при разных вариантах дорожной одежды

Определение класса грузоподъемности для нагрузки А14 производится по формуле

$$K_1 = 14 \cdot (M - M_q) / M_{A14},$$

где M – предельный изгибающий момент, кН·м; M_q – изгибающий момент от постоянной нагрузки, кН·м; M_{A14} – изгибающий момент от временной нагрузки А14, кН·м.

Для нагрузки Н14 определение класса грузоподъемности выполняется по формуле

$$K_2 = 14 \cdot (M - M_q) / M_{H14},$$

где M – предельный изгибающий момент, кН·м; M_q – изгибающий момент от постоянной нагрузки, кН·м; M_{H14} – изгибающий момент от временной нагрузки Н14, кН·м.

Результаты определения классов грузоподъемности пролетного строения при разных вариантах дорожной одежды приведены в табл. 12.

Классы грузоподъемности пролетного строения
при разных вариантах дорожной одежды

Номер варианта дорожной одежды	Класс временной нагрузки	
	АК	НК
1	24	45
2	25	46
3	25	46
4	31	58
5	31	58

Заключение и основные выводы

По результатам проведенного моделирования можно сделать вывод о том, что дорожная одежда на мостах с использованием цементобетона по своим характеристикам не уступает дорожной одежде из асфальтобетона. При этом если применять более плотный цементобетон, то его можно укладывать непосредственно на плиту проезжей части и включать дорожную одежду в совместную работу с главными балками пролетного строения. За счет этого можно увеличить предельный изгибающий момент.

Если плотный цементобетон уложить непосредственно на плиту проезжей части, то величина постоянных нагрузок уменьшится и, следовательно, изгибающий момент можно снизить на 8-15 %, перемещения – на 5-11 %.

Расчеты показывают, что цементобетонное покрытие, уложенное на плиту проезжей части, позволяет увеличить класс грузоподъемности на 26 %.

Заметим, что в России вопрос применения цементобетона при устройстве дорожных одежд на автомобильных дорогах начинает обсуждаться особенно интенсивно в последнее время, причем эта проблема курируется профессором В.В. Ушаковым [1-5]. В то же время проблема применения цементобетонных дорожных одежд на мостах пока еще находится в начальной стадии своего анализа и обсуждения.

Сделанные выше выводы получены по результатам моделирования, выполненного с использованием конечно-элементного программного комплекса «Midas Civil 2022». Но при проведении этого моделирования были использованы весьма упрощенные расчетные модели материалов пролетного строения и дорожной одежды, то есть бетон полагался линейно упругим материалом, одинаково работающим на растяжение и сжатие, чего на самом деле нет. То же можно сказать и про моделирование поведения материала слоев дорожной одежды.

Поэтому к полученным выводам нужно относиться осторожно и для получения более корректных результатов применять для расчета подход, основанный на использовании нелинейных деформационных моделей материалов [6,7], которые более корректно описывают процесс деформирования материалов пролетного строения и материалов дорожной одежды.

Список литературы

1. Ушаков, В.В. Весь мир строит дороги из цементобетона, а в России каждый год перекалывают асфальт. Как это изменить? / В.В. Ушаков. – URL: <https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22640-ves-mirstroit-dorogi-iz-cementobetona-a-v-rossii-kazhdyu-god-perekladyvayut-asfalt-kak-eto-izmenit.html> (дата обращения: 18.09.2024).
2. Ушаков, В.В. Анализ напряженно-деформированного состояния цементобетонных покрытий / В.В. Ушаков, М.А. Гуртяк // Материалы Всероссийской конференции : в 3 ч. Часть 2 / Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 350–353.

3. Носов, В.П. Цементобетонные покрытия автомобильных дорог. Прогнозирование повреждений на основе математического моделирования : монография / В.П. Носов. – Москва : МАДИ, 2013. – 228 с.
4. Попов, В.А. Исследование продольной устойчивости плит аэродромных покрытий / В.А. Попов, И.В. Демьянушко, А.А. Аверкиев // Дороги и мосты. – 2024. – № 51/1. – С. 53–69.
5. Максимов, В.А. Влияние температурного коробления на напряженно-деформированное состояние цементобетонных покрытий автомобильных дорог / В.А. Максимов, В.В. Ушаков // Дороги и мосты. – 2024. – № 52/2. – С. 151–168.
6. Ахмаджанов, М.З. Применение деформационного подхода к моделированию поведения железобетонной плиты проезжей части моста с учетом совместного воздействия силового и температурного факторов / М.З. Ахмаджанов, Ш.Н. Валиев, И. Г. Овчинников. – DOI: 10.15862/08SATS324 // Транспортные сооружения. – 2024. – Т 11, № 3. – URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS324.pdf> (дата обращения: 22.10.2024).
7. Ахмаджанов, М.З. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции, моделирующей поведение дорожной одежды на плите проезжей части моста / М.З. Ахмаджанов, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников. – DOI: 10.15862/14SATS125 (<https://doi.org/10.15862/14SATS125>) // Транспортные сооружения. – 2022. – Т. 12, № 1 ; 2025. – №1. – URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS125.pdf>.

References

1. Ushakov, V.V. The whole world builds roads from cement concrete, and in Russia they re-pave asphalt every year. How to change this? / V.V. Ushakov. – URL: <https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22640-ves-mirstroit-dorogi-iz-cementobetona-a-v-rossii-kazhdyu-god-perekладыvayut-asfalt-kak-eto-izmenit.html> (date of access: 18.09.2024).
2. Ushakov, V.V. Analysis of the stress-strain state of cement concrete pavements / V.V. Ushakov, M.A. Gurtyak // Proceedings of the All-Russian Conference : in 3 parts. Part 2 / Civil Engineering Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – St. Petersburg, 2021. – P. 350–353.
3. Nosov, V.P. Cement concrete road surfaces. Damage prediction based on mathematical modeling: monograph / V.P. Nosov. – Moscow : MADI, 2013. – 228 p.
4. Popov, V.A. Study of longitudinal stability of airfield pavement slabs / V.A. Popov, I.V. Demyanushko, A.A. Averkiev // Roads and bridges. – 2024. – No. 51/1. – P. 53–69.
5. Maksimov, V.A.. Influence of temperature warping on the stress-strain state of cement concrete road surfaces / V.A. Maksimov, V.V. Ushakov // Roads and Bridges. – 2024. – No. 52/2. – P. 151–168.
6. Akhmadjanov, M.Z. Application of deformation approach to reinforced concrete slab behaviour simulation of bridge roadway taking into account the combined effect of force and temperature factors / M.Z. Akhmadjanov, Sh.N. Valiev, I.G. Ovchinnikov. – DOI: 10.15862/08SATS324 (<https://doi.org/10.15862/08SATS324>)// Russian Journal of Transport Engineering. – 2024. – Vol. 11, № 3. – URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS324.pdf>
7. Akhmadzhanov M.Z., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.G. Analysis of the stress-strain state of a multilayer structure simulating the behavior of a road pavement on a bridge roadway slab / M.Z. Akhmadjanov, Sh.N. Valiev, I.G. Ovchinnikov. – DOI: 10.15862/14SATS125 (<https://doi.org/10.15862/14SATS125>)// Internet journal «Transport structures». – 2022. – Vol. 12, No. 1 ; 2025. – Vol. 12, Iss. 1. – URL: <https://t-s.today/issue-1-2025.html>. – URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS125.pdf>.

УДК 692.526:624.011.1

DOI 10.54734/20722958_2026_1_113

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

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Karpov5656@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

Karpov Vladimir Nikolayevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department "Building constructions"
E-mail: Karpov5656@mail.ru

ПАНЕЛИ ПЕРЕКРЫТИЯ С КЛЕеныМИ НЕСУЩИМИ РЕБРАМИ ИЗ НИЗКОСОРТНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В.Н. Карпов

Рассмотрен вопрос об использовании несущих ребер из низкосортных пиломатериалов в панелях перекрытия полносборного деревянного дома. Обоснован подход к выбору типа образцов для испытаний. Приведены результаты исследований, подтверждающие, что несущая способность и жесткость панелей достаточны для восприятия действующих на них нагрузок. Описан характер разрушения панелей перекрытия. Подсчитаны коэффициенты запаса. Показана возможность использования таких панелей в системе полносборного деревянного дома.

Ключевые слова: полносборный деревянный дом, панель перекрытия, несущая способность, жесткость, ребра из низкосортной древесины, экспериментальный образец, коэффициент запаса, прогибы, деформации, разрушающая нагрузка

FLOOR PANELS WITH GLUED CARRIAGE RIBS MADE OF LOW-GRADE WOOD

V.N. Karpov

The issue of using carriage ribs made of low-grade wood in floor panels of a prefabricated wooden house is being considered. The approach to selecting the type of samples for testing is justified. The results of studies are presented, confirming that the load-carrying capacity and rigidity of the panels are sufficient to withstand the loads acting on them. The nature of floor panel destruction is described. The safety factors have been calculated. The possibility of using such panels in the system of a prefabricated wooden house is shown.

Keywords: prefabricated wooden house, floor panel, load-carrying capacity, rigidity, low-grade wood ribs, experimental sample, safety factor, deflections, deformations, destructive load

В настоящее время в стране идет интенсивное строительство жилых домов в рамках национальных проектов, государственных и региональных программ. Для расселения аварийного жилья используются малоэтажные деревянные дома заводского изготовления. Правительству поручено поддерживать развитие промышленного деревянного домостроения [<https://rossaprimavera.ru/news/23766400>].

Крупномасштабное производство полносборных деревянных домов, выполненных из промышленных клееных панелей ребристой структуры с деревянным несущим каркасом и обшивками из древесностружечной плиты, требует большого расхода высокосортной древесины дефицитных сечений, что не может не сказаться на стоимости выпускаемых домов, на мощности домостроительных комбинатов. Поэтому была поставлена задача использования в панелях перекрытия полносборных домов ребер из низкосортной древесины. Предварительно были проведены исследования по поиску оптимальной конструкции несущих ребер из пиломатериалов пониженной

сортности, получены результаты испытаний их кратковременными статическими нагрузками [1]. Однако работа клеодошчатых ребер в системе ребристой клееной панели может существенно отличаться от их самостоятельной работы, поскольку в клееной панели одновременно участвуют в работе и ребра, и обшивки. Последнее может привести к перераспределению усилий между элементами панели и тем самым "сгладить" слабые стороны и дефекты каждого элемента (ребра и обшивки) панели.

Проведенные исследования были направлены на решение вопроса о возможности использования в качестве несущих ребер в панелях перекрытия низкосортных пиломатериалов сравнительно малых, то есть недефицитных, сечений. С этой целью предложена конструкция несущих ребер в виде клееного элемента, получаемого путем распиловки заготовки, склеенной из двух слоев тонких (22 мм) досок. При этом стыки досок по длине (сращивание) и по ширине (сплачивание) в заготовке осуществляются впритык без какой-либо дополнительной обработки [1].

При исследовании работы клееных панелей с несущими ребрами предложенной конструкции учитывалось многофакторное влияние на их прочность и жесткость. Более детальному анализу подвергалось влияние таких параметров, как сортность древесины дощатых заготовок, размещение стыков досок по длине и ширине заготовки, возможное неблагоприятное расположение дефектов материалов и наличие дефектов изготовления элементов и панели в целом. Учет указанных факторов можно осуществить лишь при проведении натурных испытаний панелей или на образцах, очень близких к ним. При этом важную роль играет не только сама конструкция и ее размеры, но и статическая схема работы, условия опирания, характер действия нагрузки.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны образцы, габаритные размеры которых по длине точно совпадают с натуральными размерами выпускаемых панелей, а по ширине – в два раза меньше. Такой образец может быть получен путем продольной распиловки одной панели на два образца, в результате:

- гарантируется полное подобие работы экспериментального образца с натуральными панелями по его длине, что обеспечивает полное совпадение расчетной схемы образца и панели;
- ширина образца (1,2 м) дает возможность проанализировать действительную работу панели по ширине, так как содержит четыре замкнутых ячейки ребристой системы;
- изготовление образцов из одной панельной заготовки исключает влияние побочных факторов, таких, как условия изготовления, однородность материалов (обшивок, клеев) и др.

Общий вид и размеры экспериментальных образцов показаны на рис. 1.

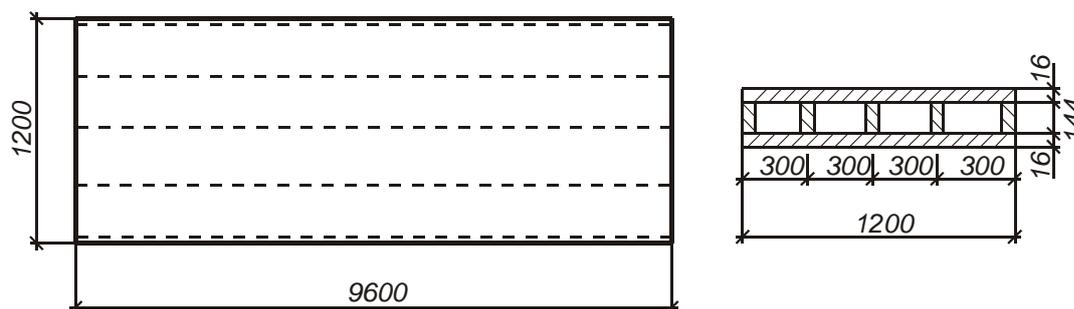


Рис. 1. Общий вид и размеры экспериментальных образцов

Данный способ изготовления позволяет в одной заготовке заложить два комплекта продольных несущих ригелей, различающихся между собой исследуемым параметром, например: два различных сорта древесины, два различных варианта расположения стыков в ригеле и т.п. Это дает возможность при исследовании влияния какого-либо параметра исключить влияние других побочных факторов, поскольку образцы будут изготовлены из одних и тех же листов древесностружечных плит, склеены клеем одного замеса, изготовлены в одних и тех же условиях.

Учитывая, что статическая схема работы экспериментальных образцов по возможности должна отражать действительную работу панелей в процессе их эксплуатации, выбор длины образцов, полностью совпадающей с размером натуральных панелей полносборного дома, позволяет принять фактическую схему их загрузки с полным подобием характера нагрузок, действующих на панель перекрытия в системе дома с мансардой. Для исследований из всего перекрытия дома взята наиболее опасная в работе панель, исходя из ее статической схемы. Сосредоточенная сила (P) имитирует нагрузку от стен мансарды, а распределенная – полезную нагрузку от жилого помещения. Нагрузки, вызванные собственным весом панели, учитывались дополнительно (рис. 2).

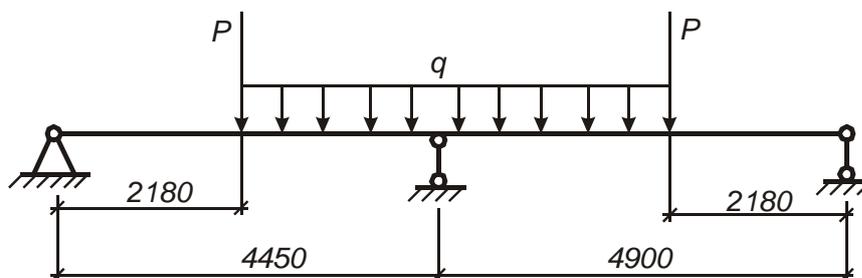


Рис. 2. Схема нагружения образцов

Исследовались образцы панелей, несущие ригели которых имели различия в следующих параметрах:

- а) сортность древесины (две группы: 1-й и 2-й сорт и 3-й или 4-й сорт);
- б) неблагоприятное расположение пороков древесины (две группы: сучки большие выходят на кромку и проходят через все сечение дощатого элемента, сучки соответствуют стандарту и не пересекают все сечение);
- в) неблагоприятное расположение стыков досок по длине панели (две группы: стыки располагаются в неопасной зоне и стыки располагаются произвольно);
- г) неблагоприятное расположение стыков досок по ширине (высоте) ригеля, получаемое при распиловке дощатой заготовки.

В целях уменьшения количества экспериментальных образцов для выявления всех вышеназванных факторов была выбрана оптимальная схема раскроя заготовок и изготовления образцов.

В основу испытаний положена ранее разработанная методика применительно к панелям перекрытия полносборного дома [2]. Нагружение проводилось этапами, на каждом из которых снимались отсчеты по приборам. Испытываемые панели доводились до разрушения. Испытанию подвергались шесть образцов, из которых один – контрольный, изготовленный с ребрами из цельных досок (ПРЦ-1), и пять – экспериментальных с клееными ребрами из низкосортной древесины (ПРК).

В основу оценки результатов испытаний положены требования прочности и жесткости конструкции, а также выводы по действительной работе конструкции и ее элементов. В процессе испытаний фиксировались следующие величины: нагрузка (по этапам), прогибы (вертикальные перемещения в характерных сечениях (на опорах и в пролетах под сосредоточенными силами), деформации (в нескольких (опасных) сечениях по длине образца и по ширине обшивки в наиболее нагруженном сечении), разрушающая нагрузка.

Результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Разрушение панелей ПРЦ-1; ПРК-2 и ПРК-3 произошло вследствие разрыва нижней обшивки. Причем само разрушение было хрупкое, хотя работу панели под нагрузкой нельзя отнести к хрупким видам. Разрыв обшивки наблюдался по всей ширине панели. Сразу же после разрыва обшивки резко возросли прогибы панели, вслед за этим наблюдался отрыв обшивок от ребер, после чего наступало общее разрушение панели.

Результаты испытаний панелей

№ п/п	Марка образца	Расчетные нагрузки			Расчетный макс. изгибающий момент, кН·м		Максимальная поперечная сила $Q_{расч}^{max}$, кН	Разрушающая нагрузка			Макс. изгиб. момент при разрушающей нагрузке, кН·м		Максимальная поперечная сила при разрушающей нагрузке $Q_{разр}^{max}$, кН	$k = \frac{M_{оп}^{разр}}{M_{оп}^{расч}}$	$k = \frac{Q_{разр}^{max}}{Q_{расч}^{max}}$
		$q_{св}$, кН/п.м	q , кН/п.м	P , кН	в пролете $M_{пр}^{расч}$	над опорой $M_{оп}^{расч}$		$q_{св}$, кН/п.м	q , кН/п.м	P , кН	в пролете $M_{пр}^{разр}$	над опорой $M_{оп}^{разр}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	ПРЦ-1	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	11,1	33,0	38,188	48,256	51,03	3,84	3,8
2	ПРК-1	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	12,4	22,5	30,624	41,511	47,94	3,82	3,58
3	ПРК-2	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	9,00	27,0	31,327	39,589	41,80	3,33	3,12
4	ПРК-3	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	8,00	24,0	27,941	35,340	37,32	2,82	2,79
5	ПРК-4	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	6,50	19,5	22,862	28,967	30,60	2,31	2,29
6	ПРК-4	0,66	2,58	7,48	9,686	12,55	13,39	0,49	7,60	22,5	26,317	33,358	35,345	2,66	2,64

Панели ПРК-4 и ПРК-5 разрушились вследствие отрыва обшивок от ребер и частичного скалывания ребер вблизи стыков досок, располагаемых вдоль ребра. При этом ребра отрывались от обшивок постепенно на отдельных участках, после чего имело место значительное нарастание прогибов панели, хотя явного разрушения панели не наблюдалось.

Были построены графики нарастания прогибов панелей, деформаций обшивок и ребер в наиболее характерных сечениях, изменения деформаций обшивки по высоте и по ширине панели.

Максимальные прогибы экспериментальных панелей при условной нормативной нагрузке (4-й этап) составили величины, равные $5,0 \div 6,8$ мм, для контрольного образца – 4 мм. Заметно просматривалась упругопластическая работа панелей с интенсивным ростом прогибов после 10-го этапа нагружения. В процессе испытаний фиксировались также деформации обшивок и ребер в наиболее характерных сечениях, т.е. в сечениях, где действуют наибольшие усилия. Графики нарастания деформаций говорят об упругой работе ребер и обшивок на всем интервале действия нагрузок. По ширине панели деформации распределяются практически равномерно. Имеют место небольшие отклонения в величинах деформаций, однако эти отклонения очень незначительны. Графики деформаций по высоте сечения панели очень хорошо подтверждают упругую работу материалов панели и согласуются с характером их распределения, принятым при работе клееных ребристых панелей.

Для оценки результатов испытаний подсчитаны коэффициенты запаса, равные $k = M_{\text{разр}}/M_{\text{расч}}$. Величины k представлены в таблице. Значения их для экспериментальных панелей колеблются от 2,31 до 3,82. Также приведены коэффициенты запаса по поперечной силе, т.е. $k = Q_{\text{разр}}/Q_{\text{расч}}$. Значения их колеблются примерно в таких же пределах – от 2,29 до 3,58. Сопоставив эти величины со значением коэффициента запаса, полученного для контрольного образца (ПРЦ-1), можно отметить, что панели с клеодошатыми ригелями, у которых наблюдаются дефекты пиломатериалов по 3-му и 4-му сорту, а также стыки досок, в том числе расположенные в опасной зоне, имеют несколько меньшие коэффициенты запаса по сравнению с панелями, где ребра выполнены из цельных досок 2-го сорта.

Панели с клеодошатыми ригелями (например ПРК-2, ПРК-3) имеют коэффициенты запаса, близкие к коэффициенту запаса контрольного образца. Это говорит о том, что панели с клеодошатыми ригелями, выполненными из низкосортных пиломатериалов, обладают несущей способностью, близкой к панелям с условными ригелями из сортовой древесины. Кроме того, многочисленные испытания панелей с цельнодеревянными ригелями показали, что коэффициенты запаса панелей по несущей способности, колеблются от 2,0 до 2,3. Для экспериментальных же панелей с клеодошатыми ригелями получены даже большие коэффициенты запаса (от 2,29 до 3,82). Однако окончательный вывод о взаимозаменяемости несущих продольных ригелей в панелях перекрытий можно сделать лишь после увеличения количества испытаний.

ВЫВОДЫ

1. Результаты натурных испытаний панелей с несущими ребрами, получаемыми путем склеивания низкосортных досок по пласти без предварительного сращивания их по длине и сплачивания по ширине, показали, что несущая способность и жесткость панелей мало отличаются от их значений для панелей, выполненных с ребрами из цельных досок повышенного качества. Коэффициентов запаса прочности достаточно для восприятия нагрузок, действующих на панель перекрытия в системе дома.

2. Относительные прогибы f/l экспериментальных панелей с клеодошатыми ребрами составили величины, равные $1/980 \div 1/720$ от пролета. Это несколько больше соответствующей величины для контрольного образца – панели с цельнодеревянными ребрами, для которой $f/l = 1/1200$. Однако эта величина полученного прогиба, приведенная к прогибу от эквивалентной длительной нагрузки, меньше предельно допустимой величины, определяемой СП 64.13330.2017. Это говорит о том, что

жесткость панелей достаточна для восприятия нормативных нагрузок, действующих на панель.

3. Выводы 1 и 2 справедливы при условии обеспечения надлежащего качества клеевых швов, соединяющих ребра с обшивками и доски ребер между собой, поскольку "сглаживание" влияния дефектов пиломатериалов и стыков досок в ребрах на работу панели наблюдается лишь при наличии совместной работы обшивок и ребер, что обеспечивается качественными клеевыми швами.

4. Работа панелей с клеодощатыми ребрами из пиломатериалов пониженной сортности отличается большей долей пластических деформаций, особенно при нагрузках, приближающихся к разрушающей. В этот момент наблюдается интенсивный рост прогибов панелей без заметных признаков разрушения. Разрушение панелей, как правило, вязкое, без явных визуальных разрывов, сколов элементов панелей и их соединений.

5. Распределение деформаций в обшивках по ширине панели характеризуется сравнительно небольшими отклонениями их в сечениях под ребрами. Это говорит о том, что при принятом шаге несущих ребер (300 мм) распределение напряжений в обшивках по ширине панели практически можно принять равномерным.

6. Испытания показали также, что на несущую способность и жесткость панелей с клеодощатыми ребрами из пиломатериалов пониженной сортности существенное влияние оказывают месторасположение по длине и высоте ребра продольных и поперечных стыков досок, их относительная площадь и наличие хорошей проклейки досок вблизи этих стыков. Панели, имеющие стыки досок в ребрах с большей площадью по отношению к рабочему сечению и выполненные с недостаточной проклейкой (панели ПРК-4 и ПРК-5), показали более низкие коэффициенты запаса ($k = 2,31$ и $k = 2,66$) по сравнению с панелями, где подобного явления не было (например панель ПРК-1, для которой $k = 3,82$, или панель ПРК-2, для которой $k = 3,33$).

Список литературы

1. Карпов, В.Н. Несущая способность и жесткость ребер панелей полносборных деревянных домов / В.Н. Карпов. – DOI: 10.54734/20722958_2024_4_97 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4. – С. 142–147.

2. Вдовин, В.М. Руководство по проведению натурных испытаний панельных конструкций полносборных деревянных домов с применением древесностружечных плит / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов / Пензенский ИСИ. – Пенза, 1988. – Деп. во ВНИИИС 12.02.88, № 8607. – 36 с.

3. Вдовин, В.М. Экспериментально-теоретические исследования промышленных панелей полносборных домов : монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов / Пензенский ГУАС. – Пенза, 2020. – 120 с.

4. Беляева, З.В. Эффективность применения клееных деревянных конструкций в современном строительстве / З.В. Беляева, Р.И. Разводов // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2019. – №1. – С.74–78. – URL: https://uniip.ru/wp-content/uploads/2019/05/1-201940_13.pdf.

5. Никифоров, Е.П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения / Е.П. Никифоров // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89933> (дата обращения: 14.06.2024).

References

1. Karpov, V.N. Load-bearing capacity and stiffness ribs panels of fully prefabricated wooden houses / V.N. Karpov. – DOI: 10.54734/20722958_2024_4_97 // Regional architecture and engineering. – 2024. – No 4. – P. 142–147.

2. Vdovin, V.M. Guidelines for conducting field tests of panel structures of prefabricated wooden houses using wood-particle boards / V.M. Vdovin, V.N. Karpov / Penza ISI. – Penza, 1988. – Dep. in VNIIS 12.02.88, No. 8607. – 36 p.

3. Vdovin V.M., Karpov V.N. Experimental and theoretical studies of industrial panels of prefabricated houses : monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov / Penza GUAS. – Penza, 2020. – 120 p.

4. Belyaeva, Z.V. Efficiency of using laminated timber structures in modern construction / Z.V. Belyaeva, R.I. Razvodov // Academic bulletin URALNIIPROEKT RAASN. – 2019. – No. 1. – P.74–78. – URL:https://uniip.ru/wp-content/uploads/2019/05/1-201940_13.pdf.

5. Nikiforov, E.P. Laminated wood: manufacturing technology, properties, advantages and disadvantages, areas of application / E.P. Nikiforov // Modern scientific research and innovation. – 2019. – No. 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89933> (access date: 06/14/2024).

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2026_1_120

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

Сафронов Максим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника»
E-mail: mksafronov@rambler.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, зав. кафедрой «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Алексеев Дмитрий Петрович, ведущий инженер кафедры «Транспортные машины»
E-mail: alekseev.dim@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

Andreev Sergey Yuryevich, Doctor of Sciences, Professor of the Department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Safronov Maxim Aleksandrovich, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St., тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich, Candidate of Sciences, Head of the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Alekseev Dmitriy Petrovich, Lead engineer of the department «Transport Vehicles»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, К.В. Лебединский, Д.П. Алексеев

Приведены результаты теоретических исследований процесса получения тонкодисперсных водовоздушных смесей компрессионно-вакуумным методом. Показано, что при компрессионном методе получения водовоздушной смеси в пересыщенном воздухом потоке жидкости образующиеся устойчивые зародышевые пузырьки должны иметь размер более $d_{\max-n}=4,15 \cdot 10^{-6}$ м, а зародышевые пузырьки воздуха, образующиеся при компрессионно-вакуумном методе, должны иметь критический размер более $d_{\max-b}=1,76 \cdot 10^{-6}$ м. Уменьшение требуемой максимальной величины объема устойчивых зародышевых пузырьков воздуха, образующихся при компрессионно-вакуумном процессе, в 20 раз по отношению к аналогичному показателю компрессионного процесса получения водовоздушной смеси существенно повышает вероятность образования пузырьков водовоздушной смеси. Внедрение компрессионно-вакуумного метода получения водовоздушной смеси на локальных канализационных очистных сооружениях позволит существенно снизить себестоимость и повысить эффективность процесса флотационной очистки сточных вод.

Ключевые слова: компрессионная флотация; компрессионно-вакуумная флотация; энергия Гиббса; водовоздушная смесь; пересыщенный раствор; коэффициент газонаполнения

NEW TECHNOLOGY OF COMPRESSION-VACUUM FLOTATION WASTEWATER TREATMENT

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, K.V. Lebedinsky, D.P. Alekseev

The article presents the results of theoretical studies of the process of obtaining finely dispersed water-air mixtures by the compression-vacuum method. It is shown that with the compression method of obtaining a water-air mixture in an air-saturated liquid stream, the stable formed germinal bubbles should have a size of more than $d_{\max-n}=4,15 \cdot 10^{-6}$ m, and the critical size of the germinal air bubbles formed with the compression-vacuum method should have a size of more than $d_{\max-b}=1,76 \cdot 10^{-6}$ m. Reducing the required maximum volume of stable germinal air bubbles formed during the compression-vacuum process by 20 times in relation to a similar indicator of the compression process of obtaining a water-air mixture significantly increases the likelihood of formation of bubbles in the water-air mixture. The introduction of a compression-vacuum method for producing an air-water mixture at local sewage treatment plants will significantly reduce the cost and increase the efficiency of the flotation wastewater treatment process.

Keywords: compression flotation; compression-vacuum flotation; Gibbs energy; water-air mixture; supersaturated solution; gas filling coefficient

В технологических процессах очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод широкое распространение получил флотационный метод, позволяющий эффективно извлекать мелкодисперсные загрязнения в результате их молекулярного прилипания к поверхности всплывающих пузырьков воздуха. В основе флотационного метода очистки сточных вод лежит процесс динамического взаимодействия двух аквасистем – естественной аквасистемы загрязнений сточных вод (смесь содержащихся в них дисперсных частиц и растворенных загрязнений) и искусственной аквасистемы дисперсной газовой фазы, создаваемой во флотационном объеме. Как правило, для получения дисперсной газовой фазы используется технологический прием выделения из пересыщенного водного раствора мелкодисперсных пузырьков воздуха. Пересыщенный раствор получается в процессе понижения давления в водном потоке, насыщенном воздухом. Пересыщенный воздухом раствор может быть получен двумя способами: 1) в процессе напорной (компрессионной) флотации; 2) в процессе вакуумной флотации.

В процессе напорной флотации насыщение воды атмосферным воздухом осуществляется в напорном баке специальной конструкции (сатураторе) при избыточном давлении 0,4-0,6 МПа. Насыщенный в сатураторе водный раствор воздуха пропускается через устройство, понижающее давление (дроссель), в результате чего раствор становится пересыщенным и из него выделяются пузырьки воздуха. Насыщение воды воздухом в процессе вакуумной флотации происходит при атмосферном давлении в аэрационной камере, затем насыщенные воздухом сточные воды подаются в вакуумную флотационную камеру, где поддерживается разрежение 0,02-0,04 МПа.

В работах [1, 2] представлен теоретический анализ процессов напорной и вакуумной флотации, который показал, что процесс напорной флотации позволяет получить во флотационном объеме водовоздушную смесь с высоким значением коэффициента газонаполнения ϕ , которая содержит пузырьки воздуха, имеющие низкую степень дисперсности. Повышенное значение эквивалентного диаметра пузырьков воздуха, образующихся во флотационном объеме в процессе напорной флотации, отрицательно сказывается на эффективности очистки сточных. Другими существенными недостатками процесса напорной флотации является высокое значение удельных энергозатрат. Процесс вакуумной флотации в отличие от процесса напорной флотации позволяет получить во флотационном объеме пузырьки воздуха, имеющие высокую степень дисперсности, и требует значительно меньших удельных энергозатрат. К недостаткам процесса вакуумной флотации относится необходимость строительства герметичных флотационных камер, требующих вложения значительных капитальных затрат и монтажа устройств, поддерживающих на должном уровне вакуум во флотационной камере.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства была разработана новая конструкция установки для получения тонкодисперсных водовоздушных смесей, позволяющая совместить преимущества процесса напорной флотации (высокое значение газонаполнения водовоздушной смеси) и процесса вакуумной флотации (малый размер образующихся пузырьков воздуха и незначительная величина удельных энергозатрат). Принципиальная схема установки для получения тонкодисперсных водовоздушных смесей представлена на рис. 1.

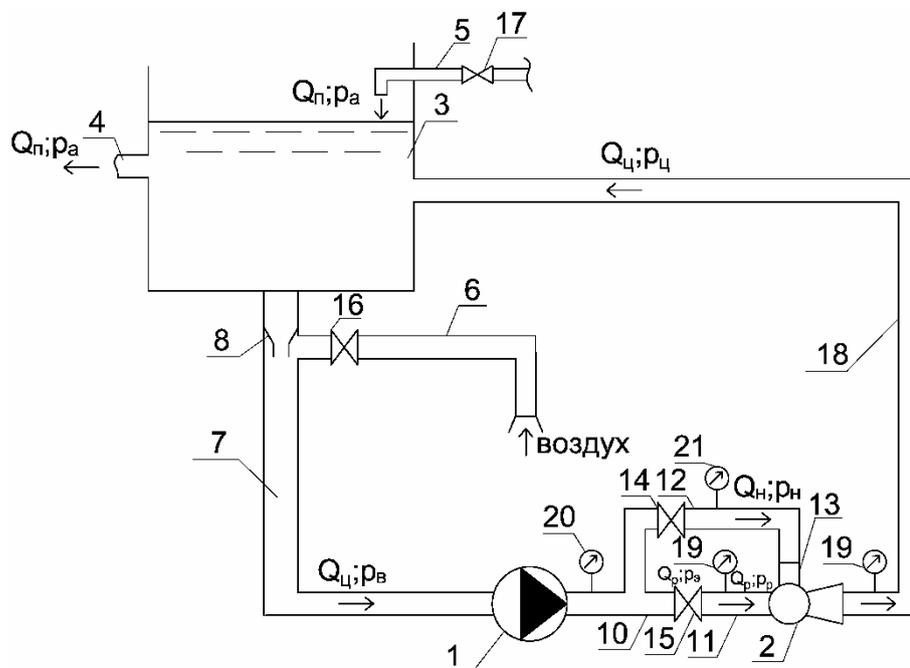


Рис. 1. Принципиальная схема установки для получения тонкодисперсных водовоздушных смесей

Установка для получения тонкодисперсных водовоздушных смесей работает следующим образом.

Полезный расход насыщенной воздухом воды Q_n , м³/с, под атмосферным давлением p_a по трубопроводу 5 подается в циркуляционный резервуар 3. Циркуляционный поток водовоздушной смеси с расходом Q_c из резервуара 3 по трубопроводу 7 поступает на центробежный насос 1 под давлением p_b . На входе в центробежный насос 1 скорость потока водовоздушной смеси поддерживается на уровне $v_c=0,8$ м/с. На выходе из рабочего сопла 8, установленного в трубопроводе 7, скорость потока водовоздушной смеси повышается до значения 1,8 м/с, что обеспечивает подсос в трубопровод 7 атмосферного воздуха по трубопроводу 6. Центробежный насос 1 повышает давление водовоздушной смеси в напорном трубопроводе 10 до значения p_b . Часть расхода водовоздушной смеси Q_n по трубопроводу 12 поступает во всасывающий патрубок 13 эжектора 2. Закрытием задвижки 14 в трубопроводе 12 поддерживается давление p_n , величина которого меньше атмосферного давления p_a . Закрытием задвижки 15 в трубопроводе 11 поддерживается давление p_p , при котором вода поступает на сопло эжектора 2. В напорном трубопроводе 11 при повышенном давлении p_p реализуются условия для проведения процесса компрессионной флотации. В трубопроводе 12, подающем водовоздушную смесь во всасывающий патрубок 13 эжектора 2, поддерживается пониженное давление p_n , в результате чего реализуются условия проведения процесса напорно-вакуумной флотации и образуется большое количество зародышей микропузырьков воздуха. На выходе из эжектора 2 в трубопроводе 18 из образовавшихся зародышевых пузырьков воздуха формируется дополнительный объем водовоздушной смеси, которая поступает в циркуляционный резервуар 3. В циркуляционном резервуаре 3 крупнодисперсные пузырьки воздуха диаметром более 0,2 мм всплывают на поверхность, а полезный расход Q_n мелкодис-

персной водовоздушной смеси поступает в трубопровод 4 и подается на процесс флотационной очистки. Запорная арматура 14, 15, 16, 17, манометры 19, 20 и вакуумметр 21 позволяют поддерживать технологические показатели процесса получения тонкодисперсной водовоздушной смеси на оптимальном уровне. Для выделения зародышевых пузырьков из пересыщенного раствора воздуха (старой фазы) не только необходимо условие превышения величины химического потенциала (над его химическим потенциалом в новой фазе), но также требуется и преодоление энергетического барьера, обусловленного наличием поверхностной энергии вновь образующейся границы раздела фаз «вода – воздух». Существование энергетического барьера препятствует возникновению в объеме раствора зародышевых пузырьков воздуха, не склонных к растворению в воде.

Если образовавшийся в растворе зародышевый пузырек имеет размер меньше критического минимального значения $d_{п.мин.л}$, м, то с высокой долей вероятности он растворится в воде. В соответствии с законом Лапласа сформировавшийся из пересыщенного раствора пузырек воздуха, не склонный к последующему растворению, должен иметь минимальный критический размер $d_{п.мин.л}$:

$$d_{п.мин.л} = \frac{4\sigma}{p_0 - p}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $\sigma=0,073$ Дж/м² – величина коэффициента поверхностного натяжения границы раздела фаз «вода – воздух» при температуре $t=20$ °С; p_0 и p – величины абсолютного давления воздуха под поверхностью водного раствора соответственно до сброса давления и после сброса давления.

При величинах $p_0=2 \cdot 10^5$ Па и $p=1 \cdot 10^5$ Па образовавшийся из пересыщенного раствора пузырек воздуха в соответствии с законом Лапласа должен иметь диаметр больше критического значения

$$d_{п.мин.л} = \frac{4 \cdot 0,073}{2 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (2)$$

Возникновение в объеме пересыщенного раствора устойчивого пузырька воздуха, не склонного к растворению в воде, возможно только в процессе спонтанной локальной флуктуации концентрации растворенного воздуха в некотором малом объеме раствора, в результате чего может наблюдаться локальное скопление достаточно большого числа молекул новой газовой фазы в жидкости. Наличие в пересыщенном растворе микровключений, выступающих в роли центров образования новой фазы, существенно интенсифицирует процесс формирования зародышевых пузырьков воздуха по аналогии с центрами конденсации и кристаллизации. Образование дисперсной системы в объеме гомогенной среды пересыщенного раствора протекает в две стадии:

1. Стадия возникновения зародышей пузырьков.
2. Стадия роста образования из зародышей пузырьков воздуха.

Первая стадия этого процесса протекает с увеличением энергии Гиббса при наличии энергетического барьера и поэтому существенно затруднена. Вторая стадия протекает самопроизвольно при значительном убывании энергии Гиббса.

Величина изменения энергии Гиббса (максимальная величина работы рассматриваемой системы) ΔG_{Γ} , Дж, включает в себя сумму работы образования новой поверхности раздела фаз ($A_{пов}$) и работы образования объема газовой фазы ($A_{об}$):

$$\Delta G_{\Gamma} = A_{пов} + A_{об} = \sigma \cdot f_n - \Delta\mu \frac{W_n}{W_{\mu}}, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где f_n – площадь поверхности зародышевого пузырька воздуха, м²; W_n – объем зародышевого пузырька воздуха, м³; $W_{\mu}=0,024$ м³/моль – объем одного моля воздуха, м³, при температуре $T=20$ °С; $\Delta\mu$ – изменение химического потенциала системы в процессе образования газовой фазы, Дж/моль.

Для зародышевого пузырька воздуха диаметром d , м, сферической формы формула (3) примет вид

$$\Delta G_r = \sigma \pi d^2 - \Delta \mu \frac{\pi d^3}{6W_\mu}, \text{ Дж.} \quad (4)$$

Величина изменения химического потенциала системы в процессе образования новой фазы может быть определена по формуле

$$\Delta \mu = RT \cdot \ln \frac{p_0}{p}, \text{ Дж/моль,} \quad (5)$$

где $R=8,31$ Дж/(моль·град) – универсальная газовая постоянная; $T=293$ К – абсолютная температура пересыщенного раствора.

В соответствии с формулой (4) для условия нулевой величины энергии Гиббса выполняется равенство

$$\Delta G_r = \sigma \pi d^2 = \Delta \mu \frac{\pi d^3}{6W_\mu} = 0 \text{ Дж.} \quad (6)$$

Откуда

$$d_0 = 6 \frac{\sigma W_\mu}{\Delta \mu}, \text{ Дж.} \quad (7)$$

Продифференцировав уравнение (4), можно найти экстремальную величину функции ΔG_r и определить критическое значение диаметра зародышевого пузырька воздуха d_{\max} , при котором величина ΔG_r будет иметь максимальное значение

$$d_{\max} = \frac{4\sigma W_\mu}{\Delta \mu}, \text{ м.} \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение (4), можно определить максимальное значение функции ΔG_r в пересыщенном растворе:

$$\Delta G_{r,\max} = \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3 W_\mu^2}{\Delta \mu^2}, \text{ Дж.} \quad (9)$$

Формулы (4), (5), (7) и (8) позволяют определить величины ΔG_r , Дж; d_0 , м; d_{\max} , м, для образовавшихся из пересыщенного раствора зародышевых пузырьков воздуха.

На рис. 2 представлены графики зависимостей величин энергии Гиббса ΔG_r , Дж, в процессе образования зародышевых пузырьков воздуха из пересыщенного раствора от значений d , м, при давлениях: 1) $p_0=2 \cdot 10^5$ Па, $p=0,3 \cdot 10^5$ Па; 2) $p_0=2 \cdot 10^5$ Па и $p=1 \cdot 10^5$ Па.

Как следует из данных, представленных на рис. 2, критические значения энергии Гиббса и диаметра зародышевого пузырька воздуха при $p_0=2 \cdot 10^5$ Па и $p=1 \cdot 10^5$ Па имеют величины $G_{r,\max}=13,12 \cdot 10^{-13}$ Дж и $d_{\max}=4,15 \cdot 10^{-6}$ м, а при $p_0=2 \cdot 10^5$ Па и $p=0,3 \cdot 10^5$ Па – соответственно $G_{r,\max}=1,76 \cdot 10^{-13}$ Дж и $d_{\max}=1,52 \cdot 10^{-6}$ м.

В случае, когда зародышевый пузырек воздуха, образовавшийся из пересыщенного раствора, будет иметь диаметр меньше критического размера d_{\max} , м, дальнейший процесс роста образовавшегося пузырька потребует увеличения энергии Гиббса, и образовавшийся пузырек растворится в воде. В случае, когда зародышевый пузырек воздуха, образовавшийся из пересыщенного раствора, будет иметь диаметр больше критического размера d_{\max} , м, дальнейший процесс роста образовавшегося пузырька будет происходить при уменьшении энергии Гиббса. Пузырек начнет быстро расти за счет процесса диффузии в него растворенного воздуха. Процесс роста образовавшихся пузырьков воздуха будет протекать до того момента времени, при котором пересыщение раствора исчезнет.

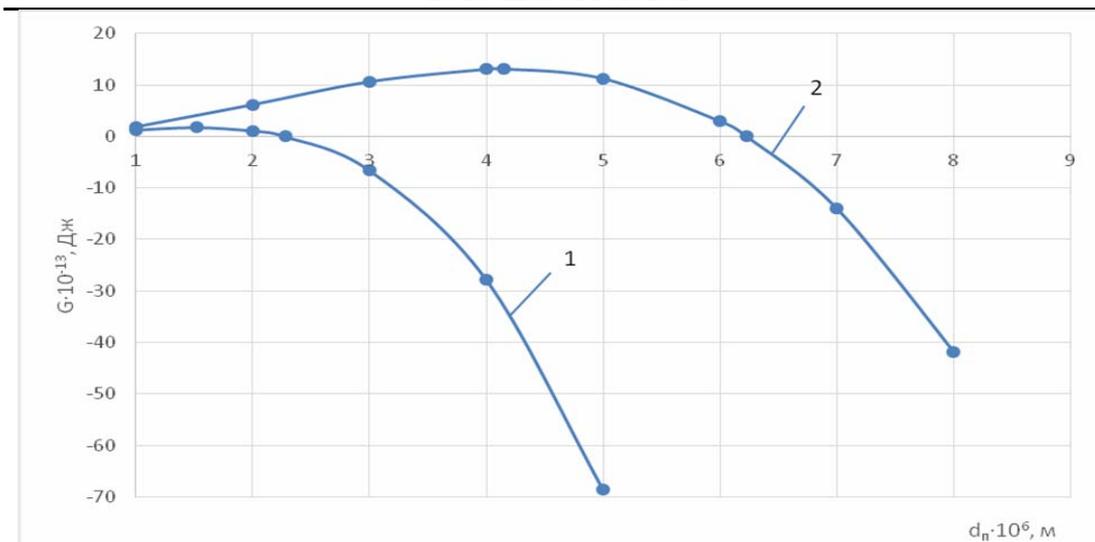


Рис. 2. Графики зависимостей величин энергии Гиббса ΔG_r , Дж, в процессе образования зародышевых пузырьков воздуха из пересыщенного раствора от значений d , м, при давлениях: 1 – $p_0=2 \cdot 10^5$ Па, $p=0,3 \cdot 10^5$ Па; 2 – $p_0=2 \cdot 10^5$ Па и $p=1 \cdot 10^5$ Па

В трубопроводе 11 (см. рис. 1) протекает процесс напорной флотации, при которой при перепаде давления с $p_0=2 \cdot 10^5$ до $p=1 \cdot 10^5$ Па критический диаметр зародыша пузырька воздуха должен иметь большую величину, чем $d_{\max}=4,15 \cdot 10^{-6}$, а энергетический барьер при этом должен находиться на значении $G_{r,\max}=13,12 \cdot 10^{-13}$ Дж.

В трубопроводе 12 (см. рис. 1) протекает процесс напорно-вакуумной флотации, при которой при перепаде давления с $p_0=2 \cdot 10^5$ до $p=0,3 \cdot 10^5$ Па критический диаметр зародыша пузырька воздуха должен иметь большую величину, чем $d_{\max}=1,52 \cdot 10^{-6}$, а энергетический барьер при этом должен находиться на значении $G_{r,\max}=1,76 \cdot 10^{-13}$ Дж.

Величины $d_{\max}=4,15 \cdot 10^{-6}$ и $G_{r,\max}=13,12 \cdot 10^{-13}$ Дж делают маловероятным процесс образования зародышевых пузырьков воздуха в трубопроводе 11. Снижение требуемой минимальной величины объема образующихся в трубопроводе 12 зародышевых пузырьков воздуха в 20 раз и уменьшение величины энергетического барьера в 8 раз существенно повышают вероятность образования зародышевых пузырьков воздуха в трубопроводе 12.

В статье «О механизме процесса очистки сточных вод напорной флотацией» авторов Шмидта Л.И., Хаймана В.Я., Проскуракова В.А., опубликованной в журнале «Прикладная химия», 1970, №11, приводится следующая формула, позволяющая определить вероятность события A – выделения зародышевых пузырьков воздуха из пересыщенного раствора при снижении величины давления с p_0 до p , Па:

$$P(A) = c \cdot e^{-\frac{16\pi\sigma^3}{3kTp_0^2 \left(\ln \frac{p_0}{p}\right)^2}}, \quad (10)$$

где c – предэкспоненциальный коэффициент; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

При температуре водовоздушной смеси $T=293$ К в соответствии с формулой (10) вероятность события A – образования зародышевых пузырьков воздуха в трубопроводе 12 – возрастает по отношению к вероятности события B – образования зародышевых пузырьков воздуха в трубопроводе 11 – в $e^{7,27 \cdot 10^7}$ раз.

$$\bar{P} = \frac{P(A)}{P(B)} = \frac{c \cdot e^{-\frac{16 \cdot 3,14 \cdot 0,073^3}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot (0,2106)^2 \left(\ln \frac{0,2 \cdot 10^6}{0,03 \cdot 10^6}\right)^2}}}{c \cdot e^{-\frac{16 \cdot 3,14 \cdot 0,073^3}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot (0,2106)^2 \left(\ln \frac{0,2 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6}\right)^2}}} = \frac{e^{-1,12 \cdot 10^7}}{e^{-8,39 \cdot 10^7}} = e^{7,27 \cdot 10^7}. \quad (11)$$

Проведенные аналитические исследования нового метода компрессионно-вакуумного получения тонкодисперсной водовоздушной смеси позволили сделать следующие выводы:

1. В процессе реализации технологического приема получения тонкодисперсной водовоздушной смеси компрессионным методом при перепаде давления в насыщаемом воздухом потоке жидкости с $p_0=2 \cdot 10^5$ до $p=1 \cdot 10^5$ Па критический диаметр зародышевых пузырьков имеет значение $d_{\max}=4,15 \cdot 10^{-6}$, и энергетический барьер находится на уровне $G_{г.\max}=13,12 \cdot 10^{-13}$ Дж.

2. В процессе реализации технологического приема получения тонкодисперсной водовоздушной смеси компрессионно-вакуумным методом при перепаде давления в насыщаемом воздухом потоке жидкости с $p_0=2 \cdot 10^5$ до $p=0,03 \cdot 10^5$ Па критический диаметр зародышевых пузырьков имеет значение $d_{\max}=1,52 \cdot 10^{-6}$, и энергетический барьер находится на уровне $G_{г.\max}=1,76 \cdot 10^{-13}$ Дж.

3. Снижение требуемой максимальной величины объема образующихся устойчивых зародышевых пузырьков воздуха при компрессионно-вакуумном процессе в 20 раз и уменьшение значения энергетического барьера в 8 раз по отношению к аналогичным показателям компрессионного процесса получения водовоздушной смеси существенно повышают вероятность образования зародышевых пузырьков при компрессионно-вакуумном методе.

4. Внедрение компрессионно-вакуумного метода получения водовоздушной смеси на локальных канализационных сооружениях позволит существенно снизить себестоимость и повысить эффективность процесса флотационной очистки сточных вод.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации флотационной очистки за счет использования процесса вихревой сатурации сточных вод / С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, М.А. Сафронов, К.В. Лебединский // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 12(792). – С. 78–91.

2. Андреев, С.Ю. Экспериментальное исследование процесса работы установки вихревой сатурации / С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, К.В. Лебединский, Д.П. Алексеев, И.В. Марынов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4(65). – С. 153–163.

References

1. Andreev, S.Y. A new technology for the intensification of flotation purification by using the process of vortex saturation of wastewater / S.Y. Andreev, L.V. Belova, M.A. Safronov, K.V. Lebedinsky // News of higher educational institutions. Construction. – 2024. – № 12(792). – P. 78–91.

2. Andreev, S.Y. Experimental investigation of the operation of a vortex saturation unit / S.Y. Andreev, M.A. Safronov, K.V. Lebedinsky, D.P. Alekseev, I.V. Marynov // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – № 4(65). – P. 153–163.

УДК 698

DOI 10.54734/20722958_2026_1_127

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,
ассистент 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 «Организация и
автоматизация 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,
Assistant 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 «Organization and
automation of production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПО ТИПУ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова

Актуальность разработки и применения системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции является новым направлением в области климатизации православных культовых сооружений. Использование данной системы сдерживается из-за отсутствия специальных исследований в области теории и практики применения вытесняющей вентиляции в залах богослужения православных церквей, храмов и соборов. В имеющихся публикациях в области вытесняющей вентиляции применительно к зданиям различного назначения не содержится специальных сведений по выполнению расчётов, необходимых инженерам-проектировщикам для разработки системы климатизации по типу вытесняющей вентиляции в православных сооружениях. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования систем кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции для залов богослужения в православных культовых сооружениях.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха; вытесняющая вентиляция, температура, подвижность воздуха, коэффициент теплопоступления, теплопоступления, воздухообмен, конвективный поток, верхняя и нижняя зоны, стратификация, рабочая зона, зал богослужения, церковь, храм, собор

RATIONALE FOR THE USE OF DISPLACEMENT VENTILATION AIR CONDITIONING SYSTEMS FOR WORSHIP HALLS OF WORSHIP BUILDINGS

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova

The development and application of displacement ventilation air conditioning systems represents a new direction in the air conditioning of Orthodox religious buildings. The use of this system is hampered by the lack of specialized research in the theory and practice of displacement ventilation for the service halls of Orthodox churches, temples, and cathedrals. Existing publications on displacement ventilation for buildings of various purposes do not provide specific information for the calculations required by design engineers to develop displacement ventilation systems for Orthodox religious buildings. In this regard, research of displacement ventilation air conditioning systems for worship halls in Orthodox religious buildings is particularly relevant.

Keywords: air conditioning system; displacement ventilation, temperature, air mobility, heat gain coefficient, heat input, air exchange, convective flow, upper-lower zone, stratification, work zone, worship hall, church, temple, cathedral

Новым направлением в области климатизации православных культовых сооружений является применение систем кондиционирования воздуха по принципу вытесняющей вентиляции. Однако использование данной системы сдерживается из-за отсутствия исследований в области теории и практики применения вытесняющей вентиляции в залах богослужения православных церквей, храмов и соборов.

По данным специалистов [1–6], эффективность вытесняющей вентиляции очевидна, когда в зданиях различного назначения имеются тепловые источники, формирующие восходящие конвективные потоки воздуха. Такие условия характерны для залов богослужения, где основными источниками являются теплота от сгорания церковных свечей и лампадного масла, отопительные приборы в холодный период года, а также тепловыделения от прихожан и солнечной радиации через наружные ограждения.

В журналах АВОК по вопросам вентиляции и кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции опубликован комплекс статей отечественных и зарубежных авторов [2–7], в которых приведены некоторые сведения в области применения данных систем, а также физических процессов воздушных потоков воздухоораспределения, отмечены достоинства и недостатки системы вытесняющей вентиляции. При этом не рассматриваются исследования применительно к православным культовым сооружениям.

Имеющиеся публикации в области вытесняющей вентиляции не содержат специальных справочных данных и методик по выполнению расчётов, необходимых инженерам-проектировщикам и эксплуатационникам. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования систем кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции для залов богослужения православных культовых сооружений, что обусловлено также массовым восстановлением, реставрацией и строительством церквей, храмов и соборов в последние годы.

Большинство систем вентиляции и кондиционирования воздуха в России и за рубежом действуют по принципу перемешивающей вентиляции. При этом приточный воздух подается в верхнюю или среднюю зону помещения при схеме воздухообмена «сверху вниз» или «сверху вверх». Данные системы необоснованно перемещают большие объемы приточного воздуха, подаваемого в верхнюю зону, при этом используются высокоскоростные воздухоораспределители для подачи приточного воздуха до нижней зоны. При вытесняющей вентиляции приточный воздух подается непосредственно в нижнюю зону по схеме воздухообмена «снизу вверх». Это дает ощутимые преимущества по сравнению с перемешивающей вентиляцией в плане качества воздуха в нижней зоне, сокращения воздухообмена и экономии энергоресурсов, затрачиваемых на производство теплоты и холода.

Приводится следующая классификация систем вытесняющей вентиляции, используемых в зданиях различного назначения (рис.1 а, б, в, г), разработанная на основании литературных данных.

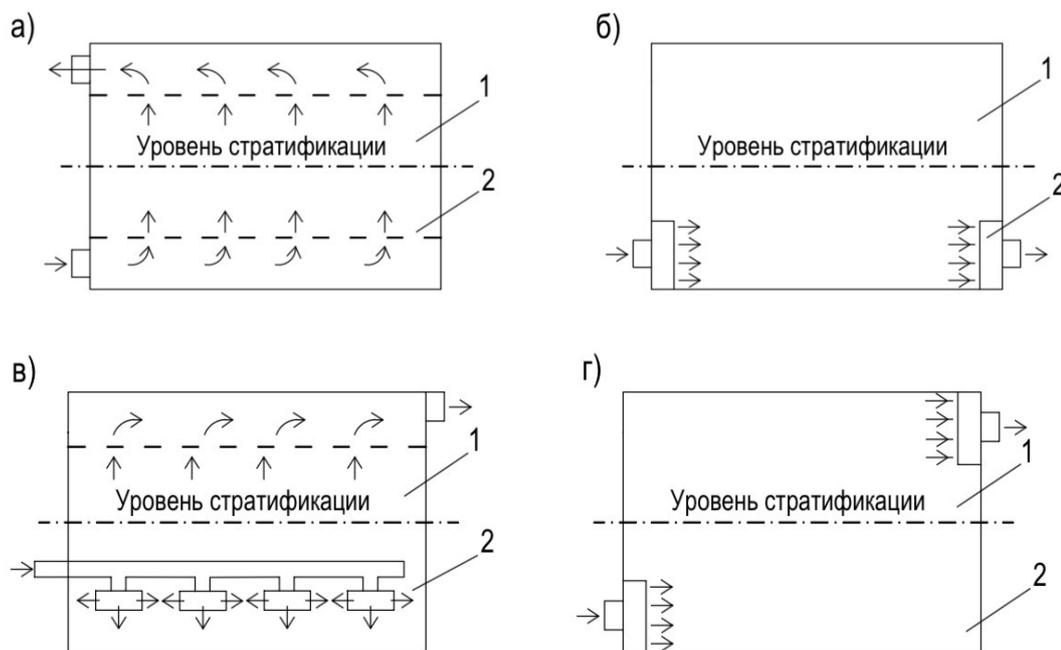


Рис. 1. Схемы вытесняющей вентиляции:

- а – вертикальная однонаправленная по схеме «снизу вверх»;
- б – горизонтальная однонаправленная по схеме «снизу вниз»;
- в – термовытесняющая по схеме «снизу вверх»; г – вертикальная по схеме «снизу вверх»;
- 1 – верхняя зона помещения выше уровня стратификации;
- 2 – нижняя зона помещения до уровня стратификации

По данным имеющихся источников, в системах вытесняющей вентиляции формируются вертикальные горизонтальные однонаправленные потоки приточного воздуха, поступающие через воздухораспределители в полу (рис. 1,а), стенах (рис. 1,б) или в зоне ближе к уровню стратификации (рис. 1,в) и через воздухораспределители в нижней зоне (рис. 1, г).

Из-за малой изученности принципов вытесняющей вентиляции, используемой с целью климатизации залов богослужения православных культовых сооружений, применяется вентиляция перемешивающего типа. В данном случае приточный воздух смешивается с загрязненным воздухом помещения (копотью, сажей, газами, влагой и др.) для поддержания требуемых параметров внутреннего воздуха с завышенными энергозатратами и объемом воздухообмена.

Это обстоятельство придает особую актуальность проблеме исследования принципов вытесняющей вентиляции применительно к залам богослужения православных церквей, храмов и соборов.

Основные принципы работы вытесняющей вентиляции заключаются в подаче приточного воздуха в нижнюю зону помещения, при этом применяется схема воздухообмена «снизу вверх» или «снизу вниз» (см. рис. 1, а, б, в, г). При вытесняющей вентиляции и указанных схемах воздухообмена приточный воздух с расчетными параметрами поступает в нижнюю зону помещения. Имеющиеся источники теплоты в данной зоне создают восходящие конвективные потоки нагретого воздуха, которые вытесняют загрязненный воздух в верхнюю зону помещения, и далее он удаляется через вытяжные устройства, расположенные в барабанах куполов. Также при вытесняющей вентиляции приточные струи воздуха с низкой турбулентностью подсасывают незначительное количество загрязненного воздуха и не способствуют перемешиванию с воздухом в нижней зоне. Это обеспечивает при минимальных энергозатратах требуемые параметры внутреннего воздуха в нижней зоне от пола до уровня стратификации. Благодаря этому при схеме воздухообмена «снизу вверх» направление

движения вентиляционного воздуха совпадает с направлением движения конвективного потока, формируемого от теплоты горячих церковных свечей, людей и других источников тепlopоступлений. В результате существенно уменьшаются воздухообмен и потребление электроэнергии, теплоты и холода. Следует иметь ввиду, что при применении при расчёте схемы воздухообмена «снизу вверх» не учитывается до 45 % тепlopоступлений от освещения и солнечной радиации, по сравнению со схемой воздухообмена «сверху вниз». Указанные теплоизбытки не достигают нижней зоны и удаляются из верхней зоны через вытяжные устройства наружу.

В данной статье рассматривается разработанная авторами модель схемы вертикального движения воздушного конвективного потока при схеме воздухообмена «снизу вверх» на примере зала богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе (рис. 2).

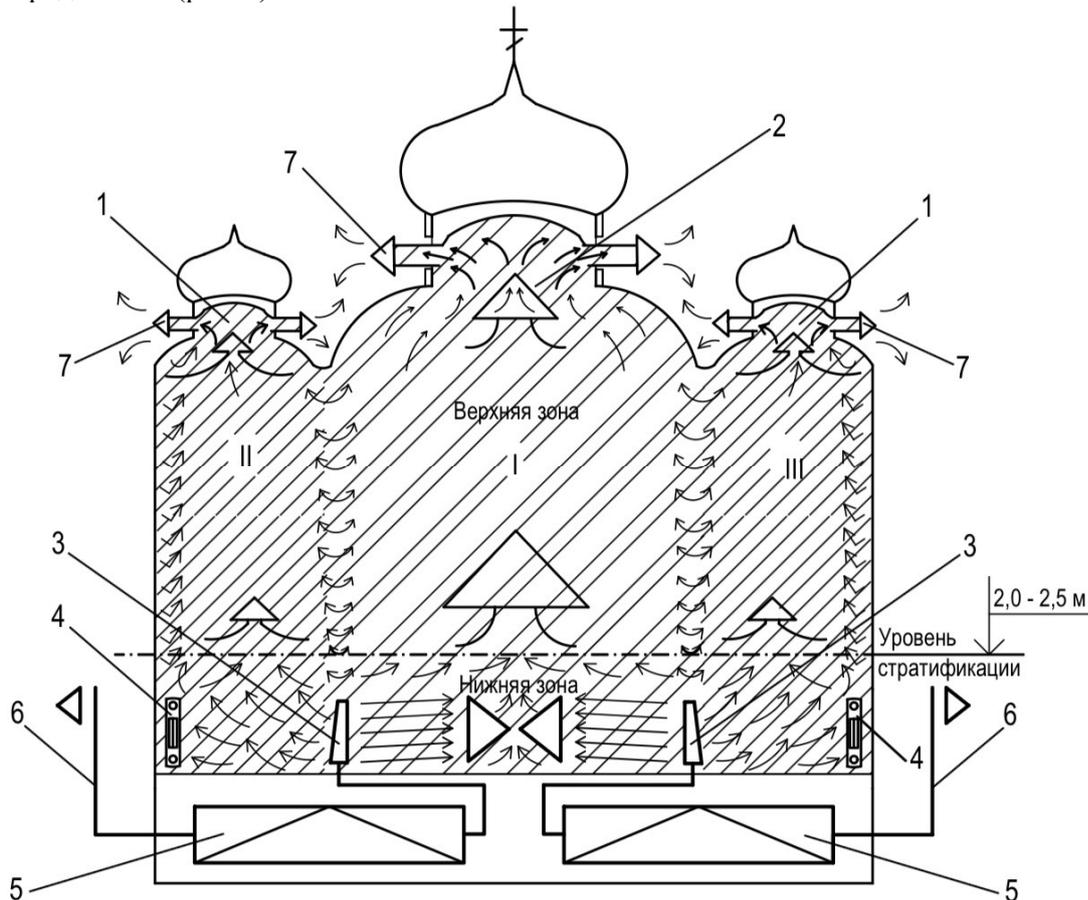


Рис. 2. Модель схемы вертикального движения конвективного потока в зоне малого и главного барабанов куполов в зале богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе:

I, II, III – область восходящего вертикального конвективного потока соответственно в зоне главного и малого куполов;

1 – барабаны малых куполов; 2 – барабан главного купола; 3 – воздухораспределитель с оппозитными щелями; 4 – отопительный прибор; 5 – кондиционер; 6 – воздухозабор; 7 – удаление внутреннего воздуха

В зале богослужения Спасского кафедрального собора установлены два кондиционера производительностью 20 тыс. м³/ч каждый, которые размещены в цокольном этаже. Наружный воздух забирается через воздухозаборные шахты 6 и через воздухораспределители 3 подается в нижнюю зону зала на отметке 0,5 м от пола. При этом используется воздухораспределитель с интенсивным гашением приточной струи, вытекающей из оппозитных щелей со скоростью 0,3-0,4 м/с, и на расстоянии до 1 метра от выхода струи скорость приточного воздуха снижается до 0,1-0,2 м/с.

Воздухораспределители установлены в нишах четырёх несущих колонн в зале богослужения, приточные струи направлены в сторону центра зала (рис.6). При этом предполагается образование пяти равномерных вертикальных конвективных потоков воздуха, движущихся с разными скоростями и объемами воздуха вверх, как поршень, через все помещения к местам удаления через вытяжные устройства, расположенные в четырёх малых и одном главном барабанах. В этом случае используемая схема воздухообмена «снизу вверх» обеспечивает более эффективное удаление теплоизбытков и загрязнений из нижней зоны по сравнению с перемешивающей вентиляцией.

В результате движения вверх конвективных струй в разных частях возникает большая устойчивость воздушного потока. При этом образуется стратификационный уровень в нижней зоне помещения на высоте 2-2,5 м, которая полностью заполняется чистым приточным воздухом (см. рис.2).

Для эффективной и устойчивой работы системы вытесняющей вентиляции количество приточного воздуха, подаваемого в нижнюю зону и удаляемого из верхней зоны помещения через вытяжные устройства в барабанах, должно равняться сумме объемов пяти конвективных потоков.

Процессы температурной и скоростной стратификации в вентилируемых помещениях различного назначения представлены в работах Батурина В.В., Кудрявцева Е.В., Сильвестрова А.Н., Шепелева И.А. и др. При вытесняющей вентиляции приточный воздух по мере движения в нижней зоне подогревается восходящими конвективными потоками от источников тепловыделений, размещённых в нижней зоне. При этом формируется уровень стратификации, который делит помещение на две зоны – верхнюю и нижнюю (см. рис. 2) – с различными параметрами температуры и скорости воздушной среды. В нижней зоне под уровнем стратификации перемешивание воздуха отсутствует и сохраняются постоянные вертикальные значения скорости и температуры внутреннего воздуха.

Результаты исследований процессов температурной t , °С и скоростной v , м/с, стратификации в зале богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе представлены на рис. 3 и 4. При вытесняющей вентиляции подтверждается высокая степень равномерности распределения воздуха по ширине и высоте зала богослужения на уровне 2-2,5 метра от пола. Натурные исследования температуры и скорости воздуха в зоне стратификации зала богослужения проводились поверенным термометром типа Teslo-440 с точностью 0,01 м/с и 0,1 °С. Линейные размеры определялись измерительной рулеткой «Каучук-Энкор» с точностью 1,1 мм.

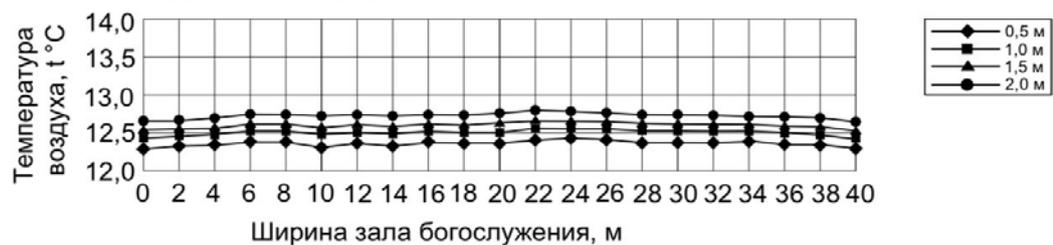


Рис. 3. Изменение температуры воздуха t , °С, в зоне стратификации по ширине и высоте зала богослужения

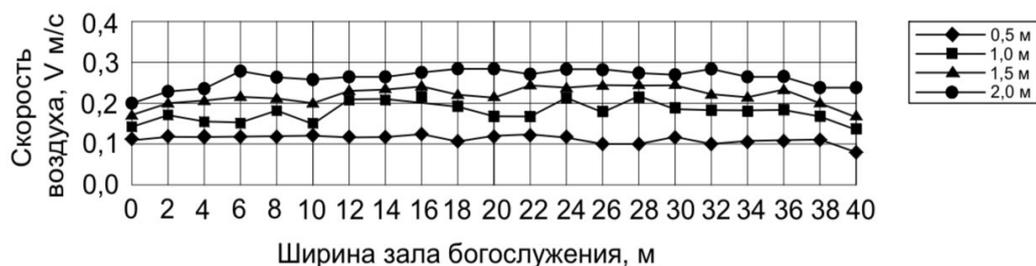


Рис. 4. Изменение подвижности воздуха v , м/с, в зоне стратификации по ширине и высоте зала богослужения

Высокая степень равномерности температуры воздуха t , °С, по ширине и высоте зоны стратификации (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м) подтверждается результатами натуральных исследований в зале богослужения, представленными на рис. 3.

Результаты натуральных исследований подвижности воздуха v , м/с, по ширине и высоте зоны стратификации (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м) приведены на рис. 4.

Результаты натуральных исследований (см. рис. 3 и 4) подтверждают, что при системах кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции обеспечиваются колебания температуры воздуха в пределах от 12,5 до 12,8 °С, а подвижность воздуха – от 0,13 до 0,28 м/с, что соответствует нормативным требованиям к параметрам внутреннего воздуха в зале богослужения [8].

Исследования t и v в зоне стратификации на высоте 2-2,5 м от уровня пола проводились с учётом суммарных тепlopоступлений от горящих церковных свечей, людей, искусственного освещения и солнечной радиации через наружные ограждающие конструкции.

В верхней зоне над уровнем стратификации происходит интенсивное перемешивание чистого и загрязненного воздуха. При этом по мере движения потока снизу вверх к местам удаления резко возрастает температурный градиент (рис. 5, график 2).

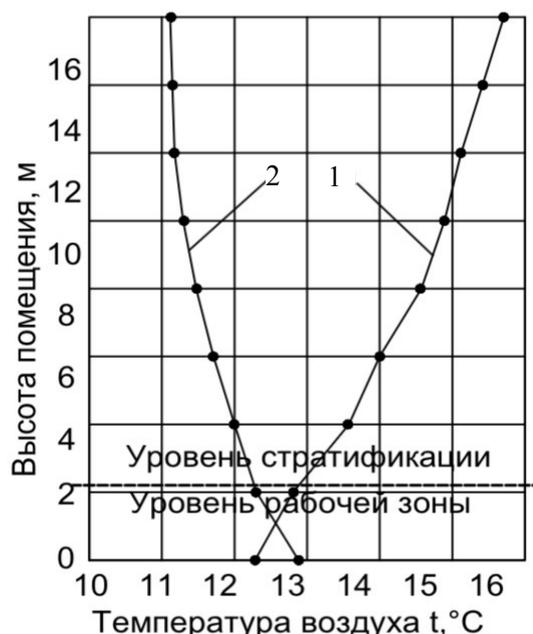


Рис. 5. Изменение температуры воздуха по высоте зала богослужения:
1 – график изменения температуры воздуха при вытесняющей вентиляции и схеме воздухообмена «снизу вверх»; 2 – график изменения температуры воздуха при перемешивающей вентиляции и схеме воздухообмена «сверху вниз»

На рис. 5 представлены графики распределения температуры воздуха по высоте в зале богослужения с вытесняющей и перемешивающей системами кондиционирования воздуха. Анализ приведённых графиков позволяет сделать вывод, что при вытесняющей вентиляции значение температуры воздуха повышается от пола до верха зала от 12,5 до 15,5 °С. При перемешивающей вентиляции температура воздуха составляет в верхней зоне 11,4 °С, а при интенсивном перемешивании приточного и внутреннего загрязненного воздуха в нижней зоне – 13,0 °С.

При вытесняющей вентиляции тепловая подушка формируется в верхней зоне, а при перемешивающей – ближе к нижней зоне зала, при этом существенно снижается качество воздуха ниже зоны стратификации.

Система кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции и схеме воздухообмена «снизу вверх» уменьшает концентрацию загрязнений (теплота, пыль,

газ, копоть, сажа, влага) в нижней зоне до 60-86 % и вытесняет их в верхнюю зону зала богослужения, откуда они удаляются вместе с воздухом.

Таким образом, для зала богослужения православных сооружений может быть решена задача перехода от перемешивающего турбулентного воздухообмена к системе кондиционирования воздуха по принципу вытесняющей вентиляции и схеме воздуха обмена «снизу вверх».

Результаты исследований в зале богослужения собора подтверждают, что система кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции обеспечивает температуру воздуха в пределах 12,6-12,8 °С и подвижность воздуха 0,12-0,2 м/с в зоне стратификации (рабочей зоне), что соответствует санитарно-гигиеническим требованиям к параметрам климатизации.

Высокая равномерность значений температуры и скорости достигается за счёт применения разработанного авторами воздухораспределителя с равномерной подачей приточного воздуха оппозитными струями с малыми скоростями непосредственно в нижнюю зону на уровне 0,5 метра от пола.

В результате применения системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции снижается тепловое напряжение воздуха в нижней зоне зала богослужения в местах тепловыделений (см. рис. 5, график 1).

Преимущество вытесняющей вентиляции в зале богослужения заключается также в значительном повышении качества воздуха в нижней зоне по сравнению с перемешивающей вентиляцией и наличии высокой температуры воздуха выше зоны стратификации. Вертикальная разность температур воздуха между рабочей и верхней зонами зала богослужения составляет около 3,0 °С (см. рис. 5, график 1), при этом воздухообмен снижается до 50 %.

Аналогичного количества воздуха в нижней зоне – в зоне стратификации – при перемешивающей вентиляции можно достичь при больших воздухообменах и более низких температурах приточного воздуха (см. рис. 5, график 2), подаваемого в верхнюю зону зала богослужения.

Для дальнейших исследований движений конвективных потоков в объеме зала богослужения предлагается рассмотреть пять вертикальных конвективных потоков, которые сформированы в зоне четырёх малых и одного большого барабанов куполов, что обусловлено установкой вытяжных устройств на разных высотах барабанов (см. рис.2).

Высота от пола до места установки вытяжного устройства в малых барабанах составляет 13,5 м, а до большого барабана – 16,3 м. В результате разных высот образуется разное по величине естественное давление воздуха в зоне купола, определяющее мощность, объем, температуру и скорость движения воздуха в конвективном потоке. Максимальные характеристики потока имеют место в зоне влияния большого барабана, меньшие – в потоке малых барабанов куполов. При этом потоки взаимодействуют между собой и влияют в зоне контактов на их характеристики.

Условные зоны и схемы движения анализируемых объективных потоков в зале богослужения представлены в виде моделей на рис. 6, движение и распределение потоков воздуха между зонами показаны стрелками, а условные пять зон выделены пунктирной линией.

Оценка характеристик конвективных потоков позволяет обеспечить эффективную организацию воздухообмена и регулирование направлений движения загрязненных потоков от поверхности стен, элементов убранства с целью сохранения культурного наследия в зоне богослужения.

В ходе проведенных исследований [9, 10, 11] установлено, что в результате применения системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции в зале богослужения сокращается объем приточного воздуха до значений, достаточных для вытеснения теплоизбытков и загрязнений из нижней зоны в верхнюю к местам их удаления, расположенным в барабанах куполов.

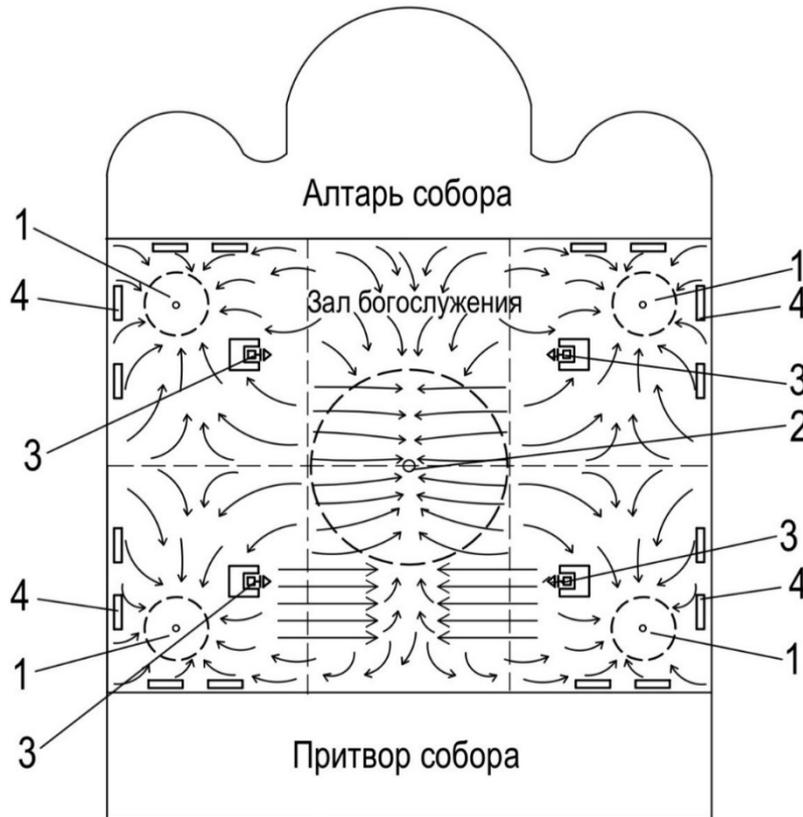


Рис. 6. Модель схемы поперечного сечения в горизонтальной плоскости вертикального конвективного потока при вытесняющей вентиляции в зале богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе:
 1 – барабаны малых куполов; 2 – барабан главного купола;
 3 – приточный воздухораспределитель; 4 – отопительный прибор

По аналогии с результатами исследований, проводившихся на ряде производственных предприятий, следует, что из суммарного количества теплоты, поступающей от оборудования $Q_{обор}$, сгорания церковных свечей и лампадного масла $Q_{свеч.лом.масл}$, прихожан $Q_{люд}$, освещения $Q_{осв}$ и солнечной радиации через стены $Q_{рад.верт.}$, световые проемы $Q_{рад.ост.}$, покрытия $Q_{рад.покр.}$, зону стратификации (рабочую зону) достигают только части теплоступлений, которые уточняются с помощью коэффициентов k теплоступлений: $k_1 Q_{обор}$, $k_2 Q_{осв}$, $k_3 Q_{рад.верт.}$, $k_4 Q_{рад.покр.}$, $k_5 Q_{рад.ост.}$, $k_6 Q_{люд}$, $k_7 Q_{свеч.лом.масл}$. Остальная часть от общих теплоступлений, выделяемых в зале богослужения $(1 - k_i Q_i)$, вытесняется конвективным потоком в верхнюю зону, откуда удаляется наружу с уходящим воздухом. Численные значения коэффициентов учёта теплоступлений в нижнюю зону стратификации ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$) определяются экспериментально (см. таблицу) и характеризуют количество теплоты, поступающей в нижнюю зону до 2–2,5 метра от пола соответственно от оборудования, освещения, солнечной радиации через стены, покрытия, остекление, от людей и горения церковных свечей и лампадного масла.

Усредненные численные значения коэффициентов теплоступлений в нижнюю и верхнюю зоны зала богослужения

Тепло поступления	Коэффициенты теплоступлений, k													
	В нижнюю зону зала							В верхнюю зону зала						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
В нижнюю зону зала богослужения	0,55	0,45	0,4	0,2	0,3	0,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-
В верхнюю зону зала богослужения	-	-	-	-	-	-	-	1-0,45	1-0,55	1-0,6	1-0,8	1-0,7	1-0,4	1-0,5

Таким образом, количество приточного воздуха ($L_{пр}$, м³/ч) в тёплый период года, необходимого для ассимиляции и вытеснения теплоступлений и загрязнений из нижней в верхнюю зону зала богослужения (см. рис. 2), а также обеспечения требуемых параметров микроклимата, рассчитывается по формуле

$$L_{пр} = \frac{3,6 \left(k_1 Q_{обр} + k_2 Q_{осв} + k_3 Q_{рад.верт} + k_4 Q_{рад.покр} + k_5 Q_{рад.ост} + k_6 Q_{люд} + k_7 Q_{свеч.лам.} + Q_{пр} \right)}{k_3 (i_{yx} - i_{пр}) \rho_v}, \quad (1)$$

где $i_{yx}, i_{пр}$ – соответственно энтальпия удаляемого и приточного воздуха, кДж/кг; ρ – плотность внутреннего воздуха, кг/м³; $Q_{пр}$ – прочие теплоступления (5 % от суммарного количества теплоступлений); k_3 – коэффициент эффективности воздухообмена, $k_3 = 2,5-4$.

При расчёте воздухообмена в зале богослужения $L_{пр}$, м³/ч, в тёплый период года в формуле (1) учитываются значения $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$; в холодный период года – только k_1, k_2, k_6, k_7 . Исходя из этого, в холодный период года общее количество приточного воздуха, подаваемого для вытеснения углекислого газа, копоти и сажи из нижней в верхнюю зону зала богослужения, рассчитывается по формуле

$$L_{пр} = \frac{(c_1 * n_{люд}) + (c_2 * n_{свеч}) + (c_3 * n_{кад}) + (c_4 * n_{лам}) + q_{проч(CO_2)}}{c_{yx(CO_2)} - c_{пр(CO_2)}}, \quad (2)$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – соответственно удельное количество углекислого газа, выделяемого от людей, свечей, кадил, лампад, л/ч; $n_{люд}, n_{свеч}, n_{кад}, n_{лам}$ – соответственно количество людей, свечей, кадил, лампад, шт; $c_{yx(CO_2)}, c_{пр(CO_2)}$ – соответственно концентрация углекислого газа в удаляемом и приточном воздухе, мг/м³; $q_{проч}$ – прочие поступления углекислого газа (3 % от общего количества), м³/ч.

На основе проведенных исследований [10, 11] авторы предлагают расчёт количества приточного воздуха, подаваемого в нижнюю зону зала богослужения для ассимиляции копоти и сажи, образующихся при сгорании церковных свечей в зале богослужения, производить по формуле

$$L_{пр} = \frac{G_{к.с.}}{(c_{yx} - c_{пр})}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3)$$

где $G_{к.с.}$ – количество копоти и сажи, выделяемых в зал богослужения при сгорании церковных свечей, мг/м³; c_{yx} – концентрация копоти и сажи в удаляемом воздухе, мг/м³; $c_{пр}$ – концентрация копоти и сажи в приточном наружном воздухе, мг/м³.

Данная методика позволяет рассчитывать воздухообмены в залах богослужения православных культовых сооружений с использованием систем кондиционирования воздуха по принципу вытесняющей вентиляции и схемы воздухообмена «снизу вверх».

В ы в о д ы :

1. Разработка и применение системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции – новое направление в области климатизации православных культовых сооружений.

2. На основании проведенных исследований установлено, что применение системы климатизации по типу вытесняющей вентиляции в православных храмах дает ощутимые преимущества по сравнению с перемешивающей вентиляцией в плане

качества воздуха в нижней зоне стратификации, а также экономии энергоресурсов при производстве теплоты и холода.

3. Разработана модель схемы вертикального и поперечного сечения конвективного потока при схеме воздухообмена «снизу вверх» в зале богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе, состоящего из четырёх малых потоков и одного большого потока в зоне барабанов куполов. Воздух, движущийся вверх, как поршень, через весь объем помещения вытесняет загрязнения из нижней зоны к местам их удаления в верхней зоне через вытяжные устройства барабанов куполов.

4. Выявлен уровень стратификации, который делит по вертикали зал богослужения на две зоны – верхнюю и нижнюю. В нижней зоне над уровнем стратификации перемешивание воздуха отсутствует и сохраняются постоянными на высоте до 2–2,5 метра значения температуры 12,5–12,8 °С и скорости 0,13–0,28 м/с воздуха, что соответствует нормативным требованиям.

5. Установлено, что в верхней зоне над уровнем стратификации происходит интенсивное перемешивание приточного и загрязненного воздуха. Определены значения температуры воздуха по высоте зала богослужения при вытесняющей и перемешивающей вентиляции.

6. В результате исследований применения системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в зале богослужения установлено, что не все теплопоступления в полном объеме поступают в нижнюю зону стратификации, а лишь часть, которая уточняется с помощью коэффициентов теплопоступлений (k). Другая часть ($1-k$) вытесняется конвективным потоком в верхнюю зону зала богослужения и удаляется наружу. Это способствует сокращению воздухообмена до 50 %.

7. Авторами разработаны методика и расчетные формулы для определения воздухообмена с учётом выделяющихся вредных веществ, поступающих в зону стратификации (теплота, газ, копоть, сажа и др.). При этом коэффициенты эффективности воздухообмена достигают 2-3 значений.

8. Натурные исследования в зале богослужения Спасского кафедрального собора в городе Пензе подтвердили, что созданная энерго- и ресурсосберегающая система кондиционирования воздуха вытесняющего типа позволяет снизить воздухообмены до 50 % и уменьшить энергозатраты на охлаждение кондиционированного воздуха до 2,5 раза.

Список литературы

1. Живов, А.М. Системы вытесняющей вентиляции для промышленных зданий. Типы, область применения, принципы проектирования /А.М. Живов [и др.] // АВОК. – 2001. – №5. – С.36–46.
2. Вытесняющая вентиляция в непромышленных зданиях. Справочное руководство RENVА. – Москва : АВОК-ПРЕСС, 2003 – С. 105.
3. Ливчак, А.В. Вытесняющая вентиляция в школах / А.В. Ливчак // АВОК. – 2004. – №8. – С. 12–15.
4. Системы вентиляции с воздухораспределителем в полу // АВОК. – 2002. – №6. – С. 40–42.
5. Шилькрот, Е.О. Вытесняющая вентиляция в непромышленных зданиях. / Е.О. Шилькрот [и др.] // АВОК. – 2003 – №1. – С.22–28.
6. McDonell, G. Распределение воздуха под полом и вытесняющая вентиляция / G Mc Donell // АВОК. – 2003. – №7. – С.28.
7. Webster, T. Система вентиляции с воздухораспределителем в полу. Температурная стратификация / Т. Webster, F. Bauman //АВОК. – 2002. – №6. – С.44–45.
8. АВОК. Стандарт – 2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «АВОК» 09.06.04. – Москва : АВОК-ПРЕСС, 2004. – 14 с.
9. Еремкин, А.И. Особенности применения вытесняющей вентиляции в системах кондиционирования воздуха в залах богослужения православных соборов и храмов /

А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2. – С. 151–158.

10. 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.

11. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44) – С. 161–168.

References

1. Zhivov, A.M. Displacement ventilation systems for industrial buildings. Types, scope of application, design principles /A.M. Zhivov [et al.] //ABOK. – 2001. – №5. – P.36–46.

2. Displacement ventilation in non-industrial buildings. Reference production RENVA. – Moscow : ABOK – PRESS, 2003. – P. 105.

3. Livchak, A.V. Displacing ventilation in schools / A.V. Livchak // ABOK. – 2004. – №8. – P. 12–15.

4. Ventilation systems with an air distributor in the floor // ABOK. – 2002. – №6. – P. 40–42.

5. Shilkrot, E.O. Displacement ventilation in non-industrial buildings / E.O. Shilkrot [et al.] // ABOK. – 2003. – №1. – P.22–28.

6. McDonell, G. Distribution of air under the floor and displacement ventilation / G. Mc Donell // ABOK. – 2003. – №7. – P.28.

7. Webster, T. Ventilation system with air distributor in the floor. Temperature stratification / T. Webster, F. Bauman //ABOK. – 2002. – №6. – P.44–45.

8. AVOK. Standard – 2-2004. Orthodox Churches. Heating, Ventilation and Air Conditioning: Industry Standard: Date of Introduction by NP “AVOK” 09.06.04. – Moscow : AVOK-PRESS, 2004. – 14 p.

9. Eremkin, A.I. Features of the application of displacing ventilation in air conditioning systems in the worship halls of Orthodox cathedrals and churches / A.I. Eremkin // Regional Architecture and Engineering. – 2020. – No. 2. – P. 151–158.

10. Eremkin, A.I. Development and approbation of the methodology for calculating air exchange based on the determination of the concentration of soot and smoke in the air during the combustion of church candles in Orthodox religious buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva // Privolzhsky scientific journal. – 2022. – No. 2. – P. 119–127.

11. Eremkin, A.I. The method of calculating the air exchange of the air conditioning system of the displacing type in the halls of worship of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva. // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3 (44) – P. 161–168.

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

Баканова Светлана Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: SvBakanova@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

Bakanova Svetlana Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: SvBakanova@mail.ru

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ С ПЛОТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ: ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С.В. Баканова

Рассматриваются особенности физического моделирования аэродинамических и тепловых процессов применительно к помещениям с плотной загрузкой. Учитывается формирование температурных и скоростных полей в штабеле хранимой продукции при вертикальной системе воздухораспределения. Подобие процессов обеспечивается тождеством уравнений, описывающих динамические и тепловые процессы, подобием условий однозначности, равенством критериев подобия.

Ключевые слова: физическое моделирование, аэродинамические и тепловые процессы, изотермическое хранение, подобие процессов, конвективный теплообмен, фильтрация воздуха

AERODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES IN DENSELY POPULATED SPACES: PHYSICAL MODELING

S.V. Bakanova

The article considers the features of physical modeling of aerodynamic and thermal processes in relation to densely loaded rooms. It takes into account the formation of temperature and velocity fields in a stack of stored products with a vertical air distribution system. The similarity of processes is ensured by the identity of the equations describing dynamic and thermal processes, the similarity of the conditions of uniqueness, and the equality of the similarity criterion.

Keywords: physical modeling, aerodynamic and thermal processes, isothermal storage, process similarity, convective heat transfer, and air filtration.

Физическое моделирование, как известно, позволяет изучать явления в целом при отсутствии реального объекта на стадии проектирования; устанавливать влияние на процесс каждого из факторов (например, конструктивных особенностей, интенсивности вентилирования и т.п.) отдельно и в любом сочетании; выполнять логические обобщения на основании отдельных экспериментов.

Известные методики моделирования тепловых и аэродинамических процессов имеют строго определенную область применения. Выбор той или иной методики в основном зависит от характера и сложности решаемой задачи, а также требований к степени точности конечного результата.

При изучении тепловых и аэродинамических процессов применительно к помещениям с плотной загрузкой необходимо было оценить формирование температурных и скоростных полей в байпасах (теплоизолирующий воздушный прослой) и в штабеле хранимой продукции при вертикальной системе воздухораспределения. Указанные параметры зависят в основном от теплотехнических свойств наружных ограждений, от

распространения и взаимодействия приточных и конвективных струй, от величины воздухообмена.

За основу моделируемого объекта было взято типовое помещение – трюм рефрижераторного судна, перевозящего мороженую рыбопродукцию. Рассматривался основной режим изотермического хранения, когда внутренние тепловыделения от продукции практически отсутствуют.

Для моделирования внешних тепlopоступлений через вертикальные наружные ограждения были использованы их специальные конструктивные решения. Они представляли собой деревянные рамы с двойным остеклением. Между стеклами была натянута теплоотдающая нихромовая спираль диаметром 0,3 мм и шагом между нитями, равным $0,36H$, где H – высота воздушной прослойки. Передача тепла к внутренней поверхности вертикального ограждения осуществлялась в данном случае за счет теплопроводности. При этом в воздушной прослойке исключалось возникновение конвективных токов. Это способствовало значительному снижению перепада температуры по высоте внутренней поверхности ограждения.

В процессе вентилирования загруженных помещений между потоком воздуха в байпасе (с переменным расходом) и теплоотдающим наружным ограждением происходит теплообмен путем свободно вынужденной конвекции (около 80 %) и лучеиспускания (около 20 %) [3]. Эти явления описываются известной системой дифференциальных уравнений, состоящих из уравнений теплообмена, энергии движения, неразрывности, диффузии и состояния. Однако можно отметить, что дифференциальные уравнения отражают лишь общие черты явления, без учета обычно индивидуальных признаков конкретного случая. Выделение конкретного случая из общего класса явлений конвективного теплообмена осуществляется дополнением системы уравнений условиями однозначности.

Переход тепла из байпасов в штабель продукции происходит за счет теплопроводности воздуха. На формирование температурных полей в штабеле продукции теплопроводность влияния практически не оказывает.

Как известно, необходимым условием моделирования является соблюдение подобия рассматриваемых процессов в природе и модели. В данном случае подобие аэродинамических и тепловых процессов в байпасе и в штабеле продукции должно обеспечиваться:

1) тождеством уравнений, описывающих динамические и тепловые процессы, а именно уравнениями:

а) движения потока Навье – Стокса

$$-\frac{dP}{dl} = -\rho q + \frac{dW}{d\tau} - \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

б) теплопроводности Фурье – Киргхгофа

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 t; \quad (2)$$

в) неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho W_z)}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

г) конвективного теплообмена

$$Q = \alpha_\kappa \cdot \Delta t \cdot \ell^2; \quad (4)$$

д) теплового баланса помещения

$$Q = G \cdot \Delta t \cdot C_p; \quad (5)$$

- 2) подобием условий однозначности: геометрических, физических, граничных;
 3) равенством критериев подобия, величины которых входят в условия однозначности.

Два последних условия составляют сущность третьей теоремы подобия и отвечают на вопрос о том, что необходимо и достаточно для подобия аэродинамических и тепловых процессов при рассматриваемом случае. Как известно, подобны те явления, условия однозначности которых подобны, а критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы.

Геометрическое подобие модели обеспечивалось пропорциональным уменьшением соответствующих геометрических характеристик натуре. В качестве типового помещения при расчете модели был принят трюм рефрижераторного судна. Общие размеры помещения (трюм и твиндека) в натуре $L_n \cdot B_n \cdot H_n = 17,8 \cdot 12,5 \cdot 6,2$ м. Исходя из практических соображений все линейные размеры уменьшили в 16 раз. Таким образом, линейный масштаб составлял:

$$C_l = \frac{[l]_m}{[l]_n} = 0,065. \quad (6)$$

При этом является необходимым обеспечение как внешнего, так и внутреннего подобия модели и натуре. Практически это означает, что число элементов загрузки модели и натуре при реализации моделирования должно оставаться неизменным. На основании вышесказанного представлялось необходимым использовать в модели загруженного помещения элементы загрузки с размерами $l_m \cdot b_m \cdot h_m = 51 \cdot 37 \cdot 14,5$ мм. С учетом геометрического масштаба, равного 0,065, обеспечивалось также подобие конструктивного оформления наружных ограждений.

Для достижения динамического подобия вентиляционных процессов в системе распределения воздуха (вентиляционная сеть – пористый слой) в соответствии с теоремой И.В. Кирпичева – А.А. Гухмана было необходимо выдержать равенство определяющего критерия Рейнольдса (Re) и определяемого критерия Эйлера (ϵ) в модели и натуре. Поскольку в рассматриваемой вентиляционной сети в натуре имеет место развитый турбулентный режим, в котором значения чисел Рейнольдса $Re > 40000$, автомодельность аэродинамических процессов в модели и натуре была обеспечена. В этом случае было необязательным соблюдать условия

$$Re_c = \text{idem} \text{ и } \epsilon_c = \text{idem}. \quad (7)$$

При этом определяемый критерий $\epsilon_c = f(Re_c)$, следовательно:

$$\xi_c = f(Re_c), \quad (8)$$

где ξ_c – коэффициент аэродинамического сопротивления системы воздухораспределения.

Известно [1, 2, 4], что штабельная загрузка в аэродинамическом плане представляет собой объем, пронизанный сетью поровых каналов. Анализ литературных данных показывает, что движение воздуха в штабельной загрузке можно рассматривать как его течение в шероховатых щелях или трещинах переменного сечения.

Основными геометрическими параметрами штабеля являются:

- пористость (ϵ , $\text{м}^3/\text{м}^3$) – доля пространства, не занятого элементами загрузки;
- удельная поверхность (a_0 , $\text{м}^2/\text{м}^3$) – поверхность элементов штабеля, приходящаяся на единицу объема штабельной загрузки.

Пористость и удельную поверхность штабеля можно определить следующими соотношениями:

$$\epsilon = \frac{V_{\text{шт}} - \sum V_{\text{эл}}}{V_{\text{шт}}}; \quad a_0 = \frac{F_{\text{эл}}}{V_{\text{эл}}}, \quad (9)$$

где $V_{шт}$ – объем штабельной загрузки, m^3 ; $V_{эл}$ – объем элемента штабельной загрузки, m^3 ; $F_{эл}$ – площадь поверхности элемента загрузки, m^2 .

Анализ уравнения движения (1) методами теории подобия позволяет для рассматриваемого случая установить следующее соотношение:

$$-\frac{dP}{d\ell} = f(Re); \quad (10)$$

оно говорит о том, что при изучении скоростных полей в слое штабельной загрузки основным условием динамического подобия является равенство чисел Рейнольдса в загрузке:

$$[Re_3]_н = [Re_3]_м, \quad (11)$$

где
$$Re_3 = \frac{W_3 \cdot d_3}{\nu}. \quad (12)$$

В качестве определяющей скорости загрузки обычно принимают условную скорость обтекания элементов штабеля потоком

$$W_3 = \frac{W_{cp}}{\varepsilon}, \quad (13)$$

где W_{cp} – средняя скорость, рассчитанная на все сечение модели с загрузкой.

Обозначая площадь этого сечения через $S = L_m \cdot B_m$, а объемный расход воздуха через V (m^3/c), имеем:

$$W_{cp} = \frac{V}{S} = \frac{V}{L_m \cdot B_m}, \quad (14)$$

т.е.
$$W_{cp} = \frac{V}{L_m \cdot B_m \cdot \varepsilon}.$$

В формуле (12) d_3 – эквивалентный диаметр поровых каналов, м, он определяется как:

$$d_3 = \frac{4\varepsilon}{\frac{F_{эл}}{V_{эл}}(1-\varepsilon)} = \frac{4\varepsilon}{a_o(1-\varepsilon)}. \quad (15)$$

В связи с тем, что $Re_3 = idem$, равенство определяемого критерия Эйлера в модели и натуре выдерживается автоматически:

$$\varepsilon u_3 = idem, \quad (16)$$

$$\varepsilon u_3 = \frac{\Delta P_3}{\rho \cdot w_3^2},$$

где ΔP_3 – потери давления в слое загрузки, Па.

Как уже отмечалось ранее, между потоками воздуха в вертикальном байпасе и теплоотдающим наружным ограждением происходит теплообмен путем свободно вынужденной конвекции. Применительно к такой постановке исследований уравнение связи между критериями подобия принимает обычный вид:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (17)$$

В уравнении (17) $Nu = \alpha \cdot \delta / \lambda$,

$$Gr = \beta \frac{q \cdot \delta^3}{\nu^2} |t_{в.п.} - t_{в}|,$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); δ – ширина байпаса, м; β – температурный коэффициент объемного расширения, 1/К; $t_{в.п.}$ – средняя температура внутренней поверхности теплоотдающего ограждения, °С; $t_{в}$ – средняя температура потока воздуха в байпасе, °С.

Возможно упрощение уравнения (17). В случае, если влияние подъемных сил, характеризуемых критерием Gr , выражено слабо, то легко прийти к выводу о допустимости исследования уравнения связи в форме $Nu = f(Re, Pr)$. Напротив, при преобладании подъемных сил перестает быть определяющим критерий Re , и будем иметь $Nu = f(Gr, Pr)$. Для определения вида конвективного теплообмена, оказывающего решающее влияние на процесс передачи тепла от теплоотдающего ограждения в байпас, были проведены предварительные экспериментальные исследования. В результате соответствующей обработки опытных данных установлено, что интенсивность теплового потока практически не оказывает существенного влияния на скорость воздуха в пограничной области наружных ограждений. Кроме того, было выявлено, что значения безразмерного симплекса избыточных температур (m_{Δ}) остаются постоянными при изменениях теплового потока в пределах значений критерия Архимеда (Ar) от $6,9 \cdot 10^{-6}$ до $3,8 \cdot 10^{-3}$. На основе этих экспериментальных данных и известных литературных сведений по выявлению преобладающего режима течения при конвективном теплообмене у поверхности было доказано, что процесс теплообмена в рассматриваемом случае происходит при вынужденной конвекции.

Критериальное же уравнение теплообмена в потоке между теплоотдающим ограждением и штабелем может быть записано в виде

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (18)$$

или

$$Nu = K \cdot Re^n \cdot Pr^c (Pr_{в} / Pr_{в.п})^m, \quad (19)$$

где $Pr_{в}$ и $Pr_{в.п}$ – критерий Прандтля, подсчитанный для средней температуры воздушного потока в наружном байпасе и средней температуры внутренней поверхности ограждения.

Отношение $Pr_{в} / Pr_{в.п}$ учитывает изменение физических параметров в пограничном слое в зависимости от направления теплового потока и величины температурного напора. В рассматриваемом случае $Pr_{в} / Pr_{в.п} = 1$. Поскольку в качестве рабочей среды как в натуре, так и в модели принимается воздух, то величина критерия Pr^c практически не зависит от температуры, и уравнение (19) принимает вид:

$$Nu = K \cdot Re_{в}^n. \quad (20)$$

Основными физическими критериями исследуемой среды являются плотность и кинематическая вязкость воздуха. Следовательно, при расчете модели должны быть учтены масштабы указанных физических параметров. Если принять нарушения условия $Q_k / Q_{\lambda} = idem$ в модели порядка $\pm 5\%$, то при изменении $[t^{mp}]_M$ в пределах от 25° до 35° оказалось допустимым применять практически постоянными основные множители преобразований C_Q, C_G, C_W . Это создает определенные удобства для экспериментатора, при этом не возникает существенной ошибки в результатах исследований. Данное обстоятельство очень важно, так как средняя температура приточного воздуха в модели $[t^{mp}]_M = var$ и ее значения в существенной степени зависят от периода года даже при наличии системы вентиляции в лаборатории.

Таким образом, если средняя температура приточного воздуха в модели $[t^{np}]_m = 30^\circ\text{C}$, а средняя температура воздуха в натуре $[t^{np}]_n = -30^\circ\text{C}$, масштабы плотности и кинематической вязкости воздуха составят:

$$C_\rho = \frac{[\rho]_m}{[\rho]_n} = \frac{1,165}{1,453} = 0,802, \quad (21)$$

$$C_\nu = \frac{[\nu]_m}{[\nu]_n} = \frac{16,00 \cdot 10^{-6}}{10,80 \cdot 10^{-6}} = 1,481. \quad (22)$$

Из уравнения подобия аэродинамических процессов в пористом слое загрузки ($Re_3 = \text{idem}$, $\varepsilon_3 = \text{idem}$), с учетом (12), определяем:

– масштаб скорости фильтрации воздуха

$$C_W = C_\nu \cdot C_\ell^{-1} = \frac{1,481}{0,065} = 22,79; \quad (23)$$

– масштаб давлений

$$C_p = C_W^2 \cdot C_\rho = 22,79^2 \cdot 0,802 = 416,55. \quad (24)$$

Анализ уравнения расхода $V = W \cdot F$ методами подобия позволяет установить следующий масштаб расхода вентиляционного воздуха в модели:

$$C_V = C_W \cdot C_\ell^2 = C_\nu \cdot C_\ell = 1,481 \cdot 0,065 = 0,096, \quad (25)$$

или в массовых единицах $G = \rho \cdot W \cdot F$

$$C_G = C_\rho \cdot C_W \cdot C_\ell^2 = 0,077. \quad (26)$$

Масштабы остальных физических величин получаем из анализа уравнений теплообмена конвекцией, теплового баланса помещения и зависимостей, определяющих расчетный воздухообмен:

$$C_Q = C_{\alpha_k} \cdot C_{\Delta t_{в.н.}} \cdot C_\ell^2, \quad (27)$$

$$C_Q = C_G \cdot C_{\Delta t_o} \cdot C_{C_p}. \quad (28)$$

Из условий $Re = \text{idem}$ и $C_t = \text{idem}$ при $C_{C_p} = 1$ нетрудно установить:

$$C_{\alpha_k} = C_{\lambda_o} \cdot C_\ell^{-1}, \quad (29)$$

$$C_{\alpha_k} = C_\rho \cdot C_W. \quad (30)$$

Подставим (30) в (27):

$$C_Q = C_{C_p} \cdot C_\rho \cdot C_W \cdot C_{\Delta t_{в.н.}} \cdot C_\ell^2. \quad (31)$$

Помним, что $C_\rho \cdot C_W \cdot C_\ell^2 = C_G$, тогда

$$C_Q = C_G \cdot C_{\Delta t_{в.н.}} \cdot C_{C_p}. \quad (32)$$

Из (28) и (31) следует, что $C_{\Delta_{\text{в.п.}}} = C_{\Delta_0}$. Из (29) и (27) имеем

$$C_Q = C_{\lambda_o} \cdot C_{\ell}^{-1} \cdot C_{\Delta_{\text{в.п.}}} \cdot C_{\ell}^2 = C_{\lambda_o} \cdot C_{\Delta_{\text{в.п.}}} \cdot C_{\ell} \quad (33)$$

Воспользуемся выводом, что $C_{\Delta_{\text{в.п.}}} = C_{\Delta_0} = C_{\Delta_t}$, тогда

$$\begin{cases} C_Q = C_{\lambda_o} \cdot C_{\Delta_t} \cdot C_{\ell} \\ C_Q = C_{C_p} \cdot C_p \cdot C_w \cdot C_{\Delta_t} \cdot C_{\ell}^2 \end{cases} \quad (34)$$

С учетом (23) имеем:

$$\begin{cases} C_Q = C_{\lambda_o} \cdot C_{\Delta_t} \cdot C_{\ell} \\ C_Q = C_{C_p} \cdot C_p \cdot C_v \cdot C_{\Delta_t} \cdot C_{\ell} \end{cases} \quad (35)$$

После решения (35) получаем:

$$C_Q = C_{C_p} \cdot C_p \cdot C_v \frac{C_Q}{C_{\lambda_o} \cdot C_{\ell}} \cdot C_{\ell} \quad (36)$$

Нетрудно видеть, что в (36) $\frac{C_{C_p} \cdot C_p \cdot C_v}{C_{\lambda_o}} = 1$ соответствует $Pr = idem$.

Из условия $Re = idem$, с учетом (23) и (26), имеем:

$$C_G = C_p \cdot C_v \cdot C_{\ell} \quad (37)$$

Из условия $Q/G = idem$ следует $C_Q = C_G$, тогда из (28) получаем:

$$C_{\Delta_0} = 1 \quad (C_{C_p} = 1).$$

Таким образом, окончательно из (27):

$$C_Q = C_{C_p} \cdot C_p \cdot C_w \cdot C_{\ell}^2 = C_p \cdot C_v \cdot C_{\ell} \quad (38)$$

Проверим:

$$C_G = C_p \cdot C_w \cdot C_{\ell}^2 = C_p \cdot C_v \cdot C_{\ell} \quad (39)$$

Для случая исследования параметров воздуха в вентилируемом объеме вполне приемлемо вместо соблюдения подобия граничного условия I рода (распределение температур на поверхностях) обеспечить подобие тепловых потоков (граничного условия II рода), что дает некоторую свободу выбора степени черноты поверхностей в модели.

С модели на натуру пересчет производился по следующим соотношениям:

– избыточных температур воздуха

$$[t_i - t^{np}]_H = (C_{\Delta_t})^{-1} \cdot [t_i - t^{np}]_M; \quad (40)$$

– скоростей

$$[W_i]_H = (C_w)^{-1} \cdot [W_i]_M; \quad (41)$$

– массовых расходов воздуха

$$[G_i]_H = (C_G)^{-1} \cdot [G_i]_M; \quad (42)$$

– весовых расходов воздуха

$$[V_i]_н = (C_V)^{-1} \cdot [V_i]_м. \quad (43)$$

Безразмерные величины симплексов избыточных температур ($m_{\Delta t}$), согласно теории подобия для модели и натуре, численно одинаковы.

Выводы

1. Изложены основные положения по моделированию аэродинамических и тепловых процессов применительно к исследуемому объекту.
2. В предложенной методике учтено формирование температурных и скоростных полей в штабеле хранимой продукции.
3. Полученные положения были использованы автором при расчете и конструировании модели.

Список литературы

1. Баканова, С.В. Методика оценки эффективности воздухораспределения и определения воздухообмена в помещениях хранения скоропортящейся продукции / С.В. Баканова, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С.130–135.
2. Баканова, С.В. Фильтрация вентиляционного воздуха через монодисперсный слой при различных условиях истечения потока / С.В. Баканова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2. – С.175–180.
3. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: моногр. / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.М. Кучеренко ; под общ. ред. В.И. Бодрова. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2008. – 623 с.
4. Баканова, С.В. Воздухообмен в помещениях хранения скоропортящейся продукции при горизонтальной системе воздухораспределения / С.В. Баканова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – №1. – С.59–64.

References

1. Bakanova, S.V. Methodology for evaluating the effectiveness of air distribution and determining air exchange in the storage rooms of perishable products / S.V. Bakanova, A.I. Eremkin // Regional architecture and construction. – 2015. – No.2. – P.130–135.
2. Bakanova, S.V. Filtration of ventilation air through a monodisperse layer under various flow conditions / S.V. Bakanova // Regional architecture and engineering. – 2011. – No.2. – P.175–180.
3. Microclimate of industrial agricultural buildings and structures : monograph / V.I. Bodrov, M.V. Bodrov, E.G. Ionychev, M.M. Kucherenko ; under the general editorship of V.I. Bodrov. – N.Novgorod : NNGASU, 2008. – 623 p.
4. Bakanova, S.V. Air exchange in rooms for storing perishable products with a horizontal air distribution system. / S.V. Bakanova // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – No.1. – P.59–64.

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

Князев Александр Анатольевич,
старший преподаватель кафедры
«Инженерная экология»
E-mail: ak-video@mail.ru

Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры
Россия, Донецкая Народная Республика,
286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2

Рожков Виталий Сергеевич,
доктор технических наук, доцент, директор
управления научно-исследовательской
деятельности и инноваций
E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.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

Knyazev Aleksander Anatolyevich,
Senior Lecturer of the Department
«Environmental Engineering»
E-mail: ak-video@mail.ru

Donbas National Academy of Civil
Engineering and Architecture
Russia, Donetsk People's Republic,
286123, Makeyevka, 2, Derzhavina St.

Rozhkov Vitalii Sergeevich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Director of the Research and Innovation
Department
E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕАГЕНТНО-ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЩЕЛОЧНОГО РАСТВОРА ФЕРРАТА НАТРИЯ

А.А. Князев, В.С. Рожков

Рассматривается процесс реагентно-флотационной очистки сточных вод с использованием щелочного раствора феррата натрия. Приводятся результаты экспериментальных исследований реагентно-флотационного метода очистки сточных вод. Исследуется процесс интенсификации коагуляционной очистки сточных вод предприятий мясной промышленности. Предлагается усовершенствованный технологический прием электрохимического синтеза щелочного раствора феррата натрия. Доказывается, что процесс коагуляционной обработки сточных вод мясокомбината может быть существенно интенсифицирован за счет использования щелочного раствора феррата натрия.

Ключевые слова: сточные воды, процесс очистки, окислительно-восстановительная система, электроактивационная обработка, реагент-окислитель, процесс нейтрализации, феррат натрия

STUDIES OF THE REAGENT-FLOTATION WASTEWATER TREATMENT PROCESS AT A MEAT PROCESSING PLANT USING AN ALKALINE SOLUTION OF SODIUM FERRATE

A.A. Knyazev, V.S. Rozhkov

The process of reagent-flotation wastewater treatment using an alkaline solution of sodium ferrate is considered. The results of experimental studies of the reagent-flotation method of wastewater treatment are presented. The process of intensification of coagulation treatment of wastewater from meat industry enterprises is studied. An improved technological method for the electrochemical synthesis of an alkaline solution of sodium ferrate is proposed for neutralization of wastewater pH. It is demonstrated that the process of coagulation treatment of wastewater from a meat processing plant can be significantly intensified by using an alkaline solution of sodium ferrate.

Keywords: wastewater, purification process, redox system, electroactivation treatment, oxidizer reagent, neutralization process, sodium ferrate

Сточные воды мясной промышленности относятся к категории сильно загрязнённых. В работах [5] приводятся данные о том, что концентрация загрязняющих веществ в сточных водах, отводимых с территории мясокомбината, имеющего цеха убоя скота, может достигать значений по показателям взвешенных веществ 500-1200 мг/л, жиров 200-900 мг/л, БПК₅ – 800-1250 мг/л. С учетом того что соотношение между показателями ХПК и БПК₅ составляет 3:1, концентрация органических загрязнений по показателям ХПК в сточных водах мясокомбинатов может достигать значений 2400-3750 мг/л. Сточные воды мясокомбинатов содержат в своем составе такие органические загрязнения, как кровь, жир, поверхностные активные вещества, каньга, кусочки тканей животных, волосы, осколки костей. Помимо органических загрязнений в сточных водах мясокомбинатов присутствуют загрязняющие вещества минерального происхождения: песок, глина, поваренная соль, фосфат-ионы, ионы аммония.

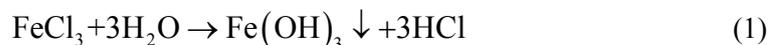
Загрязнения сточных вод мясокомбинатов находятся в форме грубодисперсных взвешенных веществ, эмульсий и суспензий, коллоидных и молекулярных растворов. Величина уровня рН сточных вод мясокомбинатов, как правило, составляет 6,8-7,6.

Для сточных вод мясокомбинатов характерно значительное содержание аммонийного азота, концентрация которого может достигать 57-120 мг/л.

Состав сточных вод мясокомбинатов в значительной мере определяется потерей сырья в процессе производства. Концентрация крови в сточных водах мясокомбинатов может достигать 0,5 % от их общего объема.

Широкое распространение на локальных канализационных очистных сооружениях предприятий мясной промышленности получил метод реагентной коагуляционной очистки сточных вод с последующим отделением скоагулированных загрязнений напорной флотацией.

В процессах реагентной очистки сточных вод мясокомбинатов в качестве реагента-коагулянта, как правило, используется хлорид железа. При наличии в сточных водах хлорида железа протекает реакция гидролиза и образуются малорастворимые в воде хлопья гидроксида железа.



Хлопья гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ имеют развитую поверхность, на которой сорбируются взвешенные вещества, мелкодисперсные и коллоидные загрязнения сточных вод.

Процесс флокуляционного удаления из сточных вод скоагулированных загрязнений – сорбированных на поверхности хлопьев гидроксида железа – протекает в 4 стадии:

1. Образование в объеме очищаемых сточных вод флотокомплексов «хлопья гидроксида железа – пузырьки воздуха».
2. Всплывание образовавшихся флотокомплексов на поверхности очищаемого объема жидкости.
3. Формирование на поверхности жидкости пенного слоя.
4. Удаление с поверхности очищаемого объема жидкости пенного слоя.

В процессе гидролиза хлорида железа образуется соляная кислота, что приводит к снижению рН сточных вод, прошедших коагуляционную обработку. На предприятиях мясной промышленности с целью нормализации уровня рН сточных вод, прошедших коагуляционную обработку хлоридом железа, используется технологический прием нейтрализации образующейся соляной кислоты водным раствором гидроксида натрия:



В последнее время для интенсификации процессов коагуляционной обработки производственных сточных вод широко применяют реагенты-окислители [1], которые позволяют разрушить гидрофильные органические соединения, стабилизирующие дисперсные примеси сточных вод, что приводит к существенному ускорению протекающих процессов коагуляции [2]. Использование реагентов-окислителей в некоторых

случаях обеспечивает сокращение дозы коагулянта в 1,5-2,5 раза [3]. В таблице приведены значения окислительных потенциалов реагентов-окислителей, используемых в технологических процессах очистки производственных сточных вод.

Значения окислительных потенциалов различных реагентов, используемых в технологических процессах очистки производственных сточных вод

Окислитель	Окислительный потенциал, В	Относительная величина окислительного потенциала от потенциала озона, %
Феррат натрия (Na_2FeO_4)	2,20	106
Озон (O_3)	2,076	100
Пероксид водорода (H_2O_2)	1,776	86
Перманганат калия (KMnO_4)	1,679	81
Хлорноватистая кислота (HClO)	1,482	71
Гипохлорит натрия (NaOCl)	1,360	65

Как следует из данных, представленных в таблице, наибольший окислительный потенциал имеет щелочной раствор феррата натрия. Окислительный потенциал щелочного раствора феррата натрия превышает окислительный потенциал самого активного из всех используемых в настоящее время реагентов-окислителей – озона.

В настоящее время синтез феррата натрия проводится тремя способами:

- Пиротехнический способ предусматривает высокотемпературное окисление соединений железа, находящихся в твердом виде.
- Химический способ, при котором соединения железа окисляются реагентами-окислителями в крепком растворе щелочи.
- Электрохимический способ обработки крепкого раствора гидроксида натрия в мембранном электролизере с пластинчатыми железными электродами.

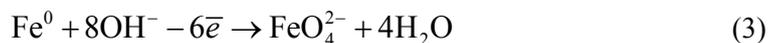
Пиротехнический способ получения феррата натрия является крайне взрывоопасным, поскольку предусматривает использование твердых окислителей, нагреваемых до высокой температуры.

Химический способ получения феррата натрия требует применения газообразного хлора, что нерационально с экологической точки зрения.

Наиболее простым и экономически выгодным является электрохимический способ получения щелочного раствора феррата натрия путем электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия, используемого для корректировки уровня pH в процессе коагуляционной обработки сточных вод, в мембранном электролизере с пластинчатыми железными электродами.

В работе [4] приводится описание процесса электроактивационной обработки 40 % водного раствора гидроксида натрия в анодной ячейке мембранного электролизера с пластинчатыми железными электродами.

При электроактивационной обработке водного раствора гидроксида натрия в анодной ячейке мембранного электролизера протекает следующая реакция:



Параллельно с анодной реакцией (3) в каталите происходит катодная реакция:



Суммарное уравнение реакции имеет вид



В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства были проведены лабораторные исследования технологии интенсификации реагентной флоатационной очистки сточных вод мясокомбината с использованием щелочного раствора феррата натрия.

Щелочной раствор феррата натрия приготавливался в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4]. Электроактивационная обработка 40 % водного раствора гидроксида натрия проводилась на анодной ячейке мембранного электролизера в течение 1,5 часа при температуре электролита $t=20-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и величине анодной плотности тока $i=200\text{ A}/\text{m}^2$.

Концентрация феррата натрия в растворе гидроксида натрия определялась фотометрическим способом и составляла $C_{\text{ф}}=4,2\text{ г}/\text{л}$.

На рис. 1 представлен общий вид лабораторной установки для электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия.



Рис. 1 Общий вид лабораторной установки

На рис. 2 показан общий вид щелочного раствора феррата натрия, прошедшего электроактивационную обработку.



Рис. 2. Общий вид щелочного раствора феррата натрия

Конструктивная схема лабораторной установки для исследования процесса реагентной флотационной очистки сточных вод мясокомбината изображена на рис. 3.

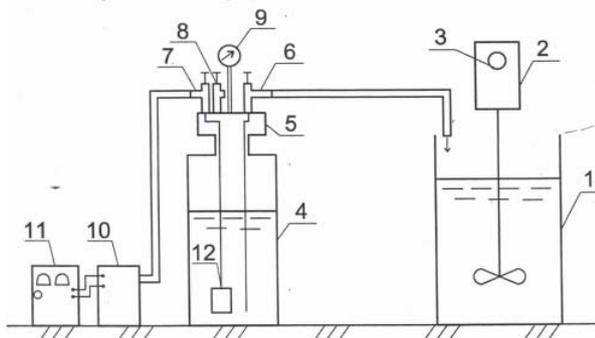


Рис. 3. Конструктивная схема лабораторной установки:

1 – лабораторный реактор; 2 – механическая мешалка; 3 – регулятор оборотов; 4 – ресивер; 5 – головка ресивера; 6 – кран для подачи водовоздушной смеси; 7 – кран для подачи воздуха; 8 – кран для отвода воздуха из ресивера; 9 – манометр; 10 – компрессор; 11 – выпрямительное устройство; 12 – диспергатор воздуха

В процессе проведения исследований коагуляционной обработки сточных вод мясокомбината контролировалось содержание органических загрязнений по показателям ХПК, БПК₅ и уровень рН.

Измерение величины рН сточных вод осуществлялось с помощью анализатора жидкости «Эксперт-001». Определение уровня ХПК в сточных водах выполнялось по стандартной методике, предусматривающей использование бихромата калия и сульфата серебра. Определение значений БПК₅ – по стандартной методике при термостатировании смеси сточных вод с дистиллированной водой в течение 5 суток без доступа воздуха при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$.

Проведенные исследования позволили определить оптимальную дозу реагента-коагулянта – хлорида железа (ГОСТ 11159-79) $D=0,4$ мл/л.

Лабораторные исследования технологии реагентной флотационной очистки сточных вод мясокомбината проводились по следующей методике.

Заданный объем тщательно взболтанных исходных сточных вод заливался в лабораторный реактор 1. Исходные сточные воды мясокомбината имели следующие характеристики: ХПК=1055 мг/л, БПК₅=350 мг/л, рН=7,2. Включалась механическая мешалка 2. Регулятором оборотов 3 на панели управления механической мешалки 2 устанавливался режим быстрого перемешивания сточных вод (160 об/мин). Затем в реактор 1 дозатором переменного объема дозировалось расчетное количество реагента-коагулянта (раствор хлорида железа дозой $D=0,4$ мл/л). Через две минуты перемешивания механическая мешалка 2 отключалась, и производилось измерение уровня рН сточных вод (рН=5,8). Часть объема сточных вод отбиралась и заливалась в ресивер 4. Включался компрессор 10, подающий воздух в диспергатор 12. Краном для отвода воздуха 8 из ресивера 4 устанавливалось избыточное давление $P_{из}=0,3 \cdot 10^6$ МПа, величина которого контролировалась манометром 9. Насыщение сточных вод воздухом проводилось в течение 5 мин. После отбора заданного объема сточных вод из реактора 1 включалась механическая мешалка 2, и регулятором оборотов 3 устанавливался режим медленного перемешивания (30 об/мин). Дозатором переменного объема в реактор 1 добавлялось расчетное количество 0,1 % водного раствора флокулянта (анионные сополимеры акриламида марки А-1050, изготовленного по ТУ2216-010-55373366-2007, дозой 0,4 мл/л).

Продолжительность медленного перемешивания составляла 5 минут. Затем механическая мешалка 2 отключалась, открывался кран 5 на головке ресивера 4, и в реактор 1 добавлялся заданный объем мелкодисперсной воздушной смеси. Прошедшие коагуляционную обработку сточные воды отстаивались в покое течение 5 минут. Образовавшиеся в объеме реактора 1 флотокомплексы «хлопья загрязнения – пузырьки воздуха» всплывали на поверхность жидкости. Затем из нижней части реактора 1 отбиралась проба обработанных сточных вод, и выполнялся их химический анализ.

На следующем этапе лабораторных исследований оценивалась степень влияния добавления подщелачивающих реагентов на эффективность коагуляционной обработки сточных вод мясокомбината. В качестве подщелачивающих реагентов использовали: 40 % водный раствор гидроксида натрия; 40 % водный раствор гидроксида натрия, который прошел электроактивационную обработку и в котором концентрация феррата натрия имела величину $C_{ф}=4,2$ мл/л.

Изучение степени влияния подщелачивающих реагентов на эффективность коагуляционной обработки сточных вод мясной промышленности проводилось по методике, аналогичной методике, которая использовалась на предыдущем этапе исследований. При дозировании в реакторе 1 реагента-коагулянта одновременно добавлялись подщелачивающие реагенты.

Результаты лабораторных экспериментальных исследований представлены в виде графиков на рис. 4 и 5.

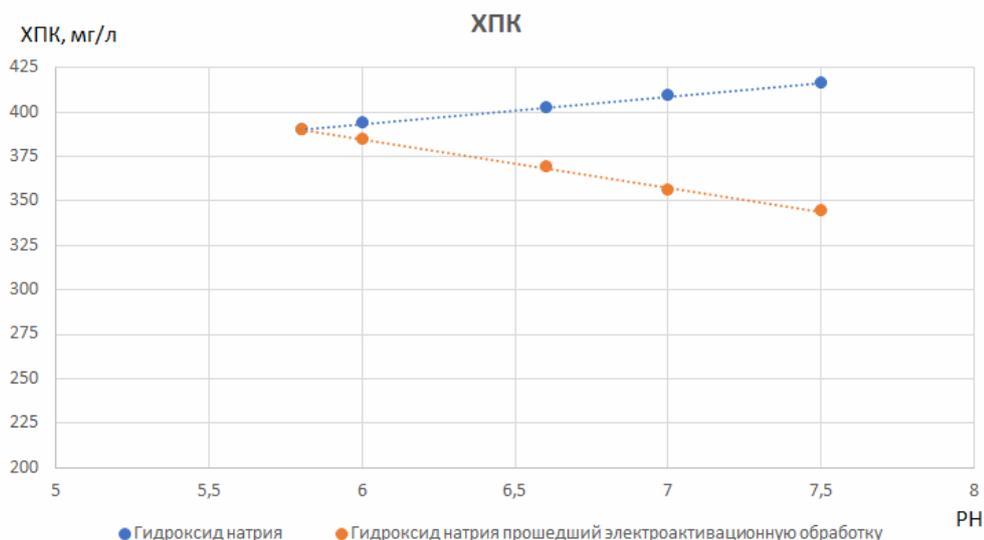


Рис. 4. Зависимость величины концентрации органических загрязнений по показателю ХПК в сточных водах мясокомбината, прошедших реагентно-флотационную очистку, от величины уровня рН обрабатываемых сточных вод

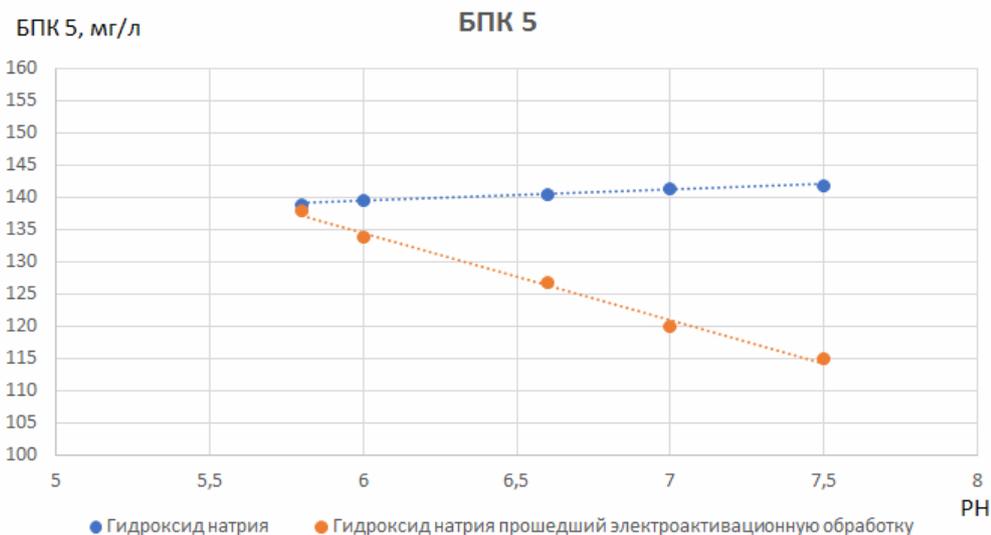


Рис. 5. Зависимость величины концентрации органических загрязнений по показателю БПК₅ в сточных водах мясокомбината, прошедших реагентно-флотационную очистку, от величины уровня рН обрабатываемых сточных вод

Обработка полученных экспериментальных данных позволила вывести следующие математические модели:

- Математическая модель, описывающая зависимость величины концентрации органических загрязнений по показателю ХПК в сточных водах мясокомбината, прошедших реагентно-флотационную очистку, от величины уровня рН обрабатываемых сточных вод:

$$\text{ХПК} = \text{ХПК}^0 \cdot K, \text{ мг/л}, \quad (6)$$

где ХПК^0 – концентрация ХПК в сточных водах, отобранных без использования подщелачивающих реагентов; K – коэффициент, величина которого при применении в качестве подщелачивающего реагента 40 % водного раствора гидроксида натрия определяется по формуле

$$K_1 = 0,645 \cdot \text{pH}^{0,25}; \quad (7)$$

при использовании в качестве подщелачивающего реагента 40 % водного раствора гидроксида натрия, прошедшего электроактивационную обработку, вычисляется по формуле

$$K_2=2,37 \cdot \text{pH}^{-0,49}. \quad (8)$$

• Математическая модель, описывающая зависимость величины концентрации органических загрязнений по показателю БПК₅ в сточных водах мясокомбината, прошедших реагентно-коагуляционную очистку, от величины уровня pH обрабатываемых сточных вод:

$$\text{БПК}_5 = \text{БПК}_5^0 \cdot K, \text{ мг/л}, \quad (9)$$

где БПК₅⁰ – концентрация БПК в сточных водах, обрабатываемых без применения подщелачивающих реагентов; K – коэффициент, величина которого при использовании в качестве подщелачивающего реагента 40 % водного раствора гидроксида натрия определяется следующим образом:

$$K_1=0,93 \cdot \text{pH}^{0,047}; \quad (10)$$

при использовании в качестве подщелачивающего реагента 40 % водного раствора гидроксида натрия прошедшего электроактивационную обработку, вычисляется по формуле

$$K_2=3,54 \cdot \text{pH}^{-0,72}. \quad (11)$$

Проведенные лабораторные экспериментальные исследования процесса реагентно-флотационной очистки сточных вод мясокомбината позволили сделать следующие выводы.

1. Электроактивационная обработка 40 % водного раствора гидроксида натрия в анодной ячейке мембранного электролизера с железными электродами в течение 1,5 часа при величине анодной плотности тока $i=200\text{А/ч}$ позволила достичь концентрации феррата в анализе $C_{\text{ф}}=4,2\text{г/л}$.

2. В процессе коагуляционной обработки сточных вод мясокомбината с использованием раствора хлорида железа дозой $D=0,4$ мл/л уровень pH сточных вод уменьшается с 7,2 до 5,8.

3. Технологический прием электроактивации 40 % водного раствора гидроксида натрия, используемого для нейтрализационной обработки сточных вод мясокомбината, прошедших коагуляционную очистку, позволяет снизить концентрации органических загрязнений в очищаемых сточных водах по показателю ХПК с 390 до 344 мг/л и показателю БПК₅ – с 139 до 115 мг/л.

Список литературы

1. Алексеев, Л.С. Основы промышленного водоснабжения и водоотведения / Л.С. Алексеев, И.И. Павлинова, Г.А. Ивлева. – Москва : АСВ, 2013. – 360 с.
2. Гогина, Е.С. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения / Е.С. Гогина, А.Д. Гуринович, Е.А. Урецкий. – Москва, 2012. – 312 с.
3. Алексеев, Е.В. Физико-химические процессы очистки сточных вод / Е.В. Алексеев. – Москва : АСВ, 2022. – 302 с.
4. Андреев, С.Ю. Исследование технологического процесса электрохимического синтеза феррата натрия в анодных ячейках мембранного электролизера / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Князев, М.С. Долгушев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 142–149.
5. Шифрина, С.М. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности / С.М. Шифрина, Г.В. Иванова, Б.Г. Мишукова. Ю.А. Феофанов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 272 с.

References

1. Alekseev, L.S. Fundamentals of Industrial Water Supply and Sanitation / L.S. Alekseev, I.I. Pavlinova, G.A. Ivleva. – Moscow : ASV, 2013. – 360 p.
2. Gogina, E.S. Resource-Saving Technologies for Industrial Water Supply and Sanitation / E.S. Gogina, A.D. Gurinovich, E.A. Uretsky. – Moscow, 2012. – 312 p.
3. Alekseev, E.V. Physico-chemical processes of wastewater treatment / E.V. Alekseev. – Moscow : DIA, 2022. – 302 p.
4. Andreev, S.Yu. Research of the technological process of electrochemical synthesis of sodium ferrate in anodic cells of a membrane electrolyzer / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, A.A. Knyazev, M.S. Dolgushev // Regional Architecture and Engineering. – 2020. – No. 2 (43). – P. 142–149.
5. Shifrina, S.M. Wastewater treatment of meat and dairy industry enterprises / S.M. Shifrina, G.V. Ivanova, B.G. Mishukova, Yu.A. Feofanov. – Moscow : Light and food industry, 1981. – 272 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72.01

DOI 10.54734/20722958_2026_1_154

*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

Лапшина Елена Геннадьевна,
кандидат архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Основы архитектурного
проектирования»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Усанов Никита Сергеевич,
ассистент кафедры «Основы
архитектурного проектирования»
E-mail: nikitausanov7621@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

Lapshina Elena Gennadyevna,
Candidate of Science in Architecture,
Professor, Head of the department
«Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Usanov Nikita Sergeevich,
Assistant of the department «Fundamentals
of Architectural Design»
E-mail: nikitausanov7621@yandex.ru

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В СИСТЕМЕ СУБЦЕНТРОВ КРУПНОГО ГОРОДА: ЗАПАДНЫЙ ЖИЛОЙ РАЙОН ПЕНЗЫ

Е.Г. Лапшина, Н.С.Усанов

Общественное пространство рассматривается как важный элемент градостроительной системы субцентров, включающий открытые участки территории города, архитектурную среду, которая предназначена для общения, взаимодействия жителей. Выделены принципы формирования и трансформации, позволяющие развивать устойчивую, доступную и живую экосистему, которая состоит из общественных пространств крупного города. В качестве примера дан анализ развития субцентра отдельного жилого района города Пензы.

Ключевые слова: общественное пространство, город, система субцентров, трансформация, код идентичности

TRANSFORMATION OF PUBLIC SPACES IN THE SYSTEM OF LARGE CITY SUBCENTERS: THE WESTERN RESIDENTIAL AREA IN PENZA

E.G. Lapshina, N.S. Usanov

Public Space is considered as an important element of the urban development system of subcenters, including open areas of the city territory, an architectural environment that is intended for communication and interaction of residents. The principles of formation and transformation are accentuated, allowing the development of a sustainable, accessible and living ecosystem, which consists of large city public space. As an example, analysis of a subcenter development is given for separate area in Penza.

Keywords: public space, city, system of subcenters, transformation, identity code

Городское общественное пространство – это важный элемент градостроительства, который включает в себя открытые и доступные участки городской территории и архитектурной среды, предназначенные для общения и взаимодействия между людьми. Согласно определению Океанова Г.В., общественное пространство представляет собой функционально организованную и благоустроенную пешеходную зону на территории общего пользования, предназначенную для движения, досуга, массовых мероприятий, других форм публичной деятельности людей в безопасных и благоприятных условиях [1]. Общественные пространства играют важную роль в создании функциональных и уютных городов, поскольку они влияют на качество жизни, социальное взаимодействие жителей и устойчивое развитие территории.

Методы и материалы. Общественные пространства формируют городские субцентры внутри общей системы районов города. Городской субцентр – это функционально и пространственно выделенная часть города, которая находится вне исторического или главного центра в которой реализуются деловые, административные, торгово-развлекательные и иные общественные функции, касающиеся значительной части городского населения. [2]. Такие субцентры располагаются за пределами центральной части города и направлены на обеспечение специфических услуг и функций, которые традиционно сосредоточены в центре городского пространства. Субцентральная модель городского планирования представляет собой концепцию организации городской территории, при которой наряду с главным центром города (центральной деловой и культурным районом) формируется система различных по значимости и функциям субцентров (второстепенных центров). В такой модели население, рабочие места, торговля, услуги, досуговые и иные важные объекты распределяются не только в одном главном центре, но и в нескольких субцентрах, размещённых в различных частях города. Такой подход способствует более равномерному распределению ресурсов, обеспечивает доступность услуг для населения, а следовательно устойчивое развитие городской среды.

Предметом настоящего исследования являются процессы трансформации и развития общественных пространств в субцентральной системе крупного города.

Общественные пространства города. К исследованию общественных пространств города на современном этапе обращаются многие авторы [3, 4, 5], поскольку вопрос развития и трансформации общественного пространства как места встреч весьма актуален в рамках национального проекта «Формирование комфортной городской среды».

Однако можно предположить, что в понятие комфортной среды входит не только благоустройство территорий общего пользования, обеспечивающее доступность мест встречи горожан, проведения досуга, отдыха и общения в условиях мягкого климата. Не менее важным представляется возможность лучшей ориентации в пешеходном пространстве города и положительные эмоции от узнавания важного для горожан места – нового (обретаемого) или прежнего (вспоминаемого). Чувство места как способ самоидентификации человека с пространством города также важно формировать в системе общественных пространств. Общественные открытые пространства в нашей стране преимущественно являются пешеходными. Встает вопрос, как оценить качество пешеходного движения в городе, а также его комфортность [6]. К решению подобного вопроса авторы обращались в связи с проблемой взаимодействия в городском общественном пространстве таких социальных групп как молодежь и пожилые люди [7]. В настоящее время предлагается рассмотреть вопрос непрерывности развития архитектурного образа города во времени и пространстве. Архитектурный образ города и его развитие, трансформация исследуются рядом авторов [8, 9]. Эта задача тесно связана с исследованием узнавания, идентичности, кодом города. Как правило, ее решение обращается прежде всего к анализу исторического центра города, места, где он зародился, откуда развивался. Это место определяет облик каждого исторического города или другого поселения. Однако не менее важно и место, где расположены жилые районы, где человек рождается и растет, где формируется основа его личности. Встреча места и личности также важна. Поэтому в ходе исследования

анализировалась система общественных пространств, сформировавшихся и трансформируемых на протяжении нескольких десятков лет на территории крупного жилого района города. В качестве примера взят район Арбеково в городе Пензе (рис. 1, а, б). Акцент сделан на главные события, знаковые имена, на выявление кода идентичности общественного пространства конкретного места в городе, его жилых окраин (спальных районов).

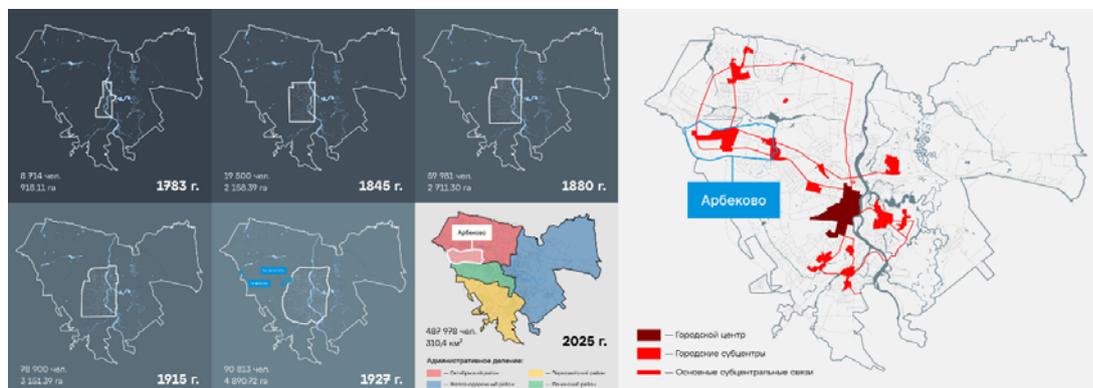


Рис. 1. Схема развития г. Пензы, а также расположение Арбековского района внутри административной системы и субцентральной модели города.

Источник: <https://retromap.ru/Пенза>

История развития территории жилого района Арбеково города Пензы. История развития рассматриваемой нами территории восходит к началу XVIII века, когда на месте современного жилого района Арбеково был основан поселок Выселки, выделившийся из Конной слободы города-крепости Пензы [10].

Основателем поселка является казак Семён Арбеков, который перевез свою семью и начал заниматься сельским хозяйством. Постепенно название поселка трансформировалось в соответствии с фамилией основателя и стало известно, как Арбеков хутор. На протяжении своего существования Арбеково претерпело значительные изменения. В XIX в. поселок начал развиваться благодаря активизации торговли и сельского хозяйства, что способствовало постепенному увеличению численности населения. С введением железнодорожного сообщения в регионе в конце XIX века Арбеково стало более доступным, что оказало положительное влияние на его экономическое и социальное развитие. В 1896 г. Арбеков хутор, расположенный в Конной волости Пензенского уезда, состоял из 14 дворов. К указанному времени он начал формироваться как самостоятельное поселение, в котором жители занимались сельским хозяйством и ремесленным производством.

В СССР к 1926 г. Арбеков хутор входил в состав Маловаляевского сельсовета Пензенской укрупненной волости и насчитывал 44 двора. В этот период в хуторе отмечался рост численности населения, что свидетельствовало об его устойчивом развитии. В 1930-е гг. в хуторе был образован колхоз имени Кирова, что позволило предоставить рабочие места для местных жителей и повысить уровень жизни в населённом пункте, а также способствовало более эффективному использованию земельных ресурсов и развитию аграрного производства. С 1958 г. Арбеков хутор входит в состав Богословского сельсовета Пензенского района. Изменение в системе администрирования оказало значительное влияние на дальнейшее развитие хутора, что проявилось в увеличении интеграции с другими населёнными пунктами и улучшении взаимодействия с местными властями. В 1960-е гг. рассматриваемая территория включена в черту города Пензы. Здесь был построен жилой район для рабочих, которые трудились на заводах и фабриках, расположенных в прилегающей промышленной зоне, развивающейся на север от центра города.

Формирование субцентра района Арбеково и его системы общественных пространств – 1-й этап. Первый этап освоения территории связан с застройкой района Ближнего Арбеково (рис. 2). Район Арбеково, находящийся в западной части г.

Пензы у въезда в город со стороны Москвы, представляет собой сочетание советской и современной архитектурной застройки. Застройка района началась на стыке 60-х и 70-х годов XX века. В начале 1970-х гг. в центральной части новостройки был заложен Парк имени Ульяновых, в процессе создания которого активно участвовали школьники и жители нового микрорайона.



Рис. 2. Жилой район Арбеково в г. Пензе. Этапы застройки.

Источник: <https://retromap.ru/Пенза>

К концу 1970-х гг. площадь парка составила 18,9 га. Несмотря на благотворное влияние зеленых насаждений на микроклимат, парк не пользовался большой популярностью у местного населения из-за недостаточного уровня освещения в вечернее время – фонари встречались крайне редко. Тем не менее, жители, приезжающие в микрорайон из центра города, отмечали высокую степень чистоты воздуха. Парк имени Ульяновых являлся первым общественным пространством нового района (рис. 3, а). Имя парка связано с семьей И. Ульянова, учительствовавшего в Пензе. С течением времени территория парка претерпела значительные изменения. В частности, были проложены тропинки в направлении остановки общественного транспорта «Сады». Их маршруты были оформлены декоративными живыми изгородями, добавлены фонари и установлены скамейки. В центральной части парка был возведен фонтан с фигурами аистов. В 1980-х гг. парк имени Ульяновых подвергся трансформации. Значительная часть территории была отдана под обустройство парка аттракционов (рис. 3, б).



Рис. 3. Парк Ульяновых – первое общественное пространство района Арбеково: а – зеленые посадки 1970-х гг.; б – парк аттракционов 1980-х гг.

Источник: <https://retromap.ru/Пенза>

Обустройство парка аттракционов в жилом районе города способствовало как улучшению качества жизни жителей, так и повышению привлекательности района в целом. Прежде всего парк аттракционов стал центром досуга для жителей всех возрастов. Это пространство предназначено для семейного отдыха. Кроме того, такой парк способствует улучшению психоэмоционального состояния. Наличие места, где можно отвлечься от повседневных забот и стрессов, жизненно важно в быстром темпе городских условий. Аттракционы и различные представления становятся источником положительных эмоций, что особенно важно для детей и подростков, поскольку они могут развивать свои социальные навыки, играя с ровесниками.

Главной транспортной артерией Ближнего Арбекова стал проспект Победы, к которому прилегал не только парк, но и яблоневый сад. За яблоневым садом располагались двухэтажные каменные здания, плавно переходящие в уличные линии, где находились деревянные дома, расположенные вдоль железной дороги, параллельно которой и был проложен проспект Победы. Таким образом, зеленые территории нового парка и старого сада выступали в качестве ключевых общественных пространств района «Ближнее Арбеково». Эти зеленые зоны предоставляли жителям возможность для активного отдыха, включая маршруты для пеших и лыжных прогулок, зоны для семейного досуга. В конце 1970-х гг. яблоневый сад был ликвидирован, что способствовало функциональному изменению территории. Там, где раньше располагалась рекреация, стали появляться общественно-деловые и производственные зоны. В результате части рекреационной зоны жители района лишились большого зеленого прогулочного пространства, ухудшилась экологическая обстановка микрорайона. Но в целом зеленое пешеходное пространство, выстраиваемое вдоль проспекта Победы и перетекающее далее в прибрежную зону ручья Дальний, сохранилось.

Развитие и трансформация системы общественных пространств района Арбеково – 2-й этап. Общественные пространства Ближнего Арбекова претерпели трансформацию в постсоветский период. К 2007 году большая часть зеленой территории парка имени Ульяновых была застроена многоэтажным жилым комплексом «Сады». В 2019 году оставшийся участок парка реконструировали, его назвали «Парк Времен». Теперь это новый благоустроенный парк с современными спортивными и детскими площадками (рис. 4).



Рис. 4. Парк Времен – пример реконструкции парка Ульяновых в Арбеково.

Источник:

https://yandex.ru/maps/org/park_vremyon/196180274616/?indoorLevel=1&ll=44.932661%2C53.230527&z=17

Рассмотренные территории сформировали линейный субцентр города, который представляет собой участок городской застройки, расположенный вдоль ключевой транспортной артерии – проспекта Победы, отмеченного памятными знаками, выражающими его смысл и отражающими облик жилого района (рис. 5).



Рис. 5. Памятные знаки вдоль проспекта Победы.
Источник: <https://autotravel.ru/otklik.php/21312>

В отличие от традиционных центров, которые чаще всего имеют более компактную и концентрированную застройку, линейные субцентры характеризуются протяжённой структурой, в ней сосредоточены не только общественные пространства, но и коммерческие, деловые функции.

Вторым этапом освоения территории стала застройка Дальнего Арбекова (рис. 6). Она выполнялась вдоль проспекта Строителей. Нововозведенные жилые дома усилили связь между линейным субцентром Ближнего Арбекова, включившим стадион и крупнейшую рекреационную территорию района – зеленый участок, окружающий ручей Дальний. Ручей Дальний представляет собой важный естественный водный объект, играющий значительную роль в экосистеме урбанизированной местности. Территория, прилегающая к ручью, характеризуется разнообразием растительности. Кроме того, ручей Дальний относится к категории водоёмов, которые используются для рекреационных целей, что делает его привлекательным для жителей района. При дальнейшем расширении площади жилой застройки были возведены небольшие зеленые участки вдоль проспекта Строителей, что послужило началом нового линейного субцентра, параллельного проспекту Победы.

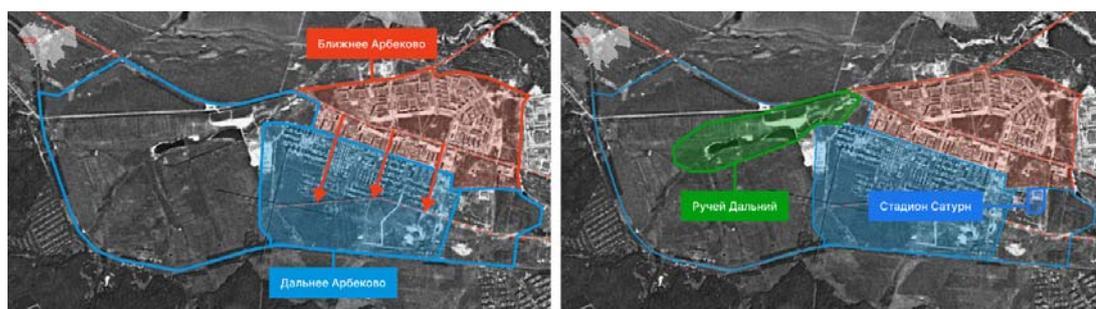


Рис. 6. Освоение территории Дальнего Арбекова.
Источник: <https://autotravel.ru/otklik.php/21312>

К общественным пространствам, появившимся вдоль новой магистральной оси, можно отнести сквер «Могилевский дворик», который представляет собой символ экономических и культурных связей с городом-побратимом в Белоруссии. Композиционным центром сквера является арка, она символизирует могилевскую ратушу. В белорусском городе Могилеве, в свою очередь, был открыт Пензенский дворик.

Размещение вдоль проспекта Строителей ряда торговых центров способствовало созданию эффективных и сбалансированных транспортных и пешеходных потоков.

Наличие торговых точек сформировало общественные пространства, способствующие социальному взаимодействию и культурному обмену между жителями района. Таким образом, в 1990-е гг. торговля становится не только экономической зоной, но и элементом социального взаимодействия, частью культурной жизни. В 2008 г. был построен спортивный комплекс «Буртасы» (рис. 7, а), это усилило социальное взаимодействие жителей жилого района, а также привлекло сюда гостей города.

В 2013 году общественное пространство выстроилось вблизи главного культурного узла субцентра Арбеково, им стала библиотека им. М.Ю. Лермонтова (рис. 7, б), перевезенная из исторического центра города в этот крупный жилой район. На базе библиотеки функционируют более двадцати студий и клубов различных направлений (курсы разговорного английского языка, театральное искусство, рукоделие и др.). Ежегодно в библиотеке организуются масштабные фестивали и всероссийские акции, такие, как «Библионочь», «Ночь искусств», «Ночь кино», Православный книжный фестиваль, книжный фестиваль «Открытый мир библиотек», межрегиональная книжная выставка-ярмарка «Мир книг на Пензенской земле», а также архитектурная выставка молодежи и школьников «ТатлинФест». Подобные мероприятия способствуют развитию культурной активности и повышению интереса к чтению и библиотечным услугам среди населения.



Рис. 7. Проспект Строителей:

а – торговые точки вдоль пр. Строителей; б – общественные пространства вдоль пр. Строителей. Источник: <https://welcome2penza.ru/guide/sportivnye-obekty/sportivnye-obekty/penza/258/>

Результаты и обсуждения. В настоящее время прослеживается кольцевая структура субцентра Арбековского района, состоящая из двух линейных связей – проспекта Победы и проспекта Строителей (рис. 8). Кольцевая модель предполагает создание общественных пространств с многофункциональными зонами, которые могут обеспечивать разнообразные услуги и давать возможность жителям района удовлетворять свои потребности в общении без длительных поездок, с помощью пешеходных связей.

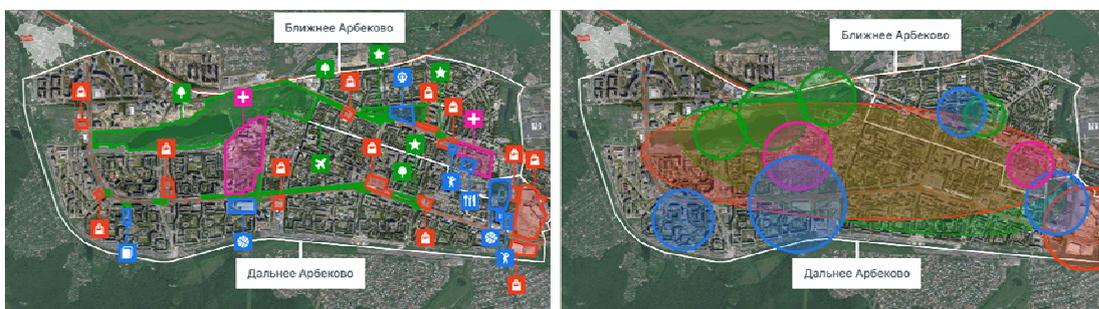


Рис. 8. Кольцевая структура субцентра Арбековского района

Особенности формирования архитектурного облика Арбековского района и «душа» места. Арбековский район города Пензы, расположенный в западной части города, отличается своим географическим положением и ландшафтом, который играет

ключевую роль в формировании его визуального образа. Он включает как возвышенности (например, гора «Каланча»), крупные жилые массивы, так и низменности, природные зоны, что создает многогранную картину его восприятия, особый код идентичности. Важным элементом, влияющим на визуальный облик общественных пространств района, является его плотная жилая застройка. Арбековский район представляет собой один из крупнейших спальных районов Пензы, известный типичными для советской эпохи архитектурными решениями – большими жилыми микрорайонами, доминирующим образом которых стали панельные многоэтажные дома. Эти архитектурные элементы, несмотря на определенную стилистическую простоту, могут быть адаптированы в современную идентичность района в рамках формирования ретро-акцентов.

Ещё одной ключевой особенностью географического положения Арбеково является его окружение, природная среда. Район богат зелеными зонами, включая лесопарковые массивы и небольшие водоемы, что важно для создания комфортного проживания. Природные элементы, зеленые пространства – это часть визуальной идентичности места. Они отражают его экологическую основу, которая выросла из яблоневых садов. Использование в парке средового дизайна на основе естественных текстур и мотивов – деревьев, воды и мягких природных оттенков, подчеркивает экологически благоприятный образ Арбекова.

Арбековский район города Пензы несет в себе отголоски времени, когда темы рабочего класса, трудового подвига были ключевыми в общественной и культурной жизни советского народа. Поскольку формирование района началось в 1960–1970-х годах, в период активного роста города и урбанизации, сопровождавшихся ускоренным строительством жилых массивов для трудящихся, связь района с рабочим классом, его исторической значимостью и культурным наследием становится очевидной. Большинство зданий в районе было построено на основе типового проектирования советского времени. Таким образом, сам облик района изначально был заложен как пространство для тех, кто своим трудом представлял страну на мировой арене, символизируя силу и мощь рабочего класса. Важным элементом для образования общественных пространств стали социальные объекты – школы и детские сады, магазины и поликлиники, позволявшие централизованно обеспечить комфортные условия для жизни трудящихся. Эти здания сохраняют архитектурный отпечаток эпохи, ориентированной на удовлетворение потребностей советских людей.

Как и в других городах Советского Союза, значительное внимание в Пензе уделялось формированию общественного сознания через культуру труда. Памятники, названия улиц, многие из которых до сих пор отсылают к героям труда, революции или ключевым событиям советской истории, культурные учреждения района направляли людей на осознание важности рабочего класса как ключевого звена функционирования советского общества. Символично, что даже сейчас Арбековский район сохраняет этот дух трудового наследия. Многие жители района – это потомки рабочих, связанных с историей заводов и фабрик Пензы, район продолжает быть жилым массивом, где трудовая этика и повседневная жизнь переплетаются.

Таким образом, Арбековский район Пензы можно рассматривать как «живой» памятник рабочему классу. Он является отражением времени, когда труд, а не капитал, был высшей ценностью, а облик города – олицетворением единства народа и функциональности территории. Современное развитие района даёт возможность сохранить память о той эпохе, интегрируя её элементы в современную культурно-историческую среду города.

В понятие идентичности включается не только внешний облик общественных пространств, но и «душа» места, его уникальные визуальная и культурная составляющие, которые определяют, как район воспринимают жители, гости и инвесторы, включающиеся в его развитие. Для Арбековского района города Пензы создание уникальной идентичности – ключ к трансформации, улучшению качества жизни и повышению привлекательности для местных жителей и туристов. Код идентичности сегодня помогает создать уникальный образ района. Для большинства населения

города Пензы Арбековский район ассоциируется в первую очередь с крупным спальным микрорайоном, где преобладают многоэтажные дома советского периода, появляются современные жилые комплексы и развитая инфраструктура. Однако начинают складываться специфические черты и новый образ, который объединяет жителей, позволяет им чувствовать свою принадлежность к месту и гордиться им. Начинается разработка современного бренда Арбековского района, основанного на его природных и исторических ресурсах, это подчеркивает уникальность района, как части «зеленого» города Пензы.

Таким образом, можно утверждать, что история жилого района Арбеково неразрывно связана с Великой Отечественной войной. Он был основан как дом для рабочих заводов и фабрик, эвакуированных в Пензу из других городов страны. Здесь формировалась коллективная жизнь советских людей, объединенных общей целью.

Символом этой эпохи стали широкие проспекты, названные в честь великих побед. Проспект Победы – это не просто название, а дань памяти тем, кто выжил в войне и отстоял свое право на жизнь. Эта первая транспортная артерия, вокруг которой выросли общественные пространства Арбеково, была названа в честь Великой Победы и воина-победителя. Интересно, что и сам район сохранил имя своего первого поселенца – казака Семёна Арбекова, который когда-то построил здесь свой дом.

Вторая ключевая транспортная артерия – проспект Строителей. Вокруг него развивались общественные пространства второго этапа освоения Арбеково. Их центрами стали спортивно-оздоровительный комплекс «Буртасы» и культурно-просветительный центр в библиотеке им. М.Ю. Лермонтова. Эти названия также глубоко символичны. «Буртасы» – это древнее название коренных жителей пензенских земель, расположенных вдоль реки Суры. Всемирно известный поэт М. Ю. Лермонтов вырос в Сурском крае, в имении своей бабушки Арсеньевой, что создает прочную связь между ним, этим местом и его народом.

Выводы. Анализ общественных пространств, представленных в статье, их трансформации во времени и пространстве показал различие в подходах к организации места встреч горожан на разных исторических этапах. Рассмотренная трансформация общественных пространств жилого района Арбеково в городе Пензе, включенных в кольцевую систему линейных субцентров – по главной оси проспекта Победы и проспекта Строителей, раскрыла их ключевую роль в формировании на современном этапе более устойчивой, доступной и при этом живой экосистемы городского района, что имеет прямое влияние на жизнь населения и развитие города в настоящем и будущем. Динамично развивающаяся модель системы общественных пространств обеспечивает создание многофункциональных зон, пригодных для пешеходных прогулок, отдыха и общения горожан, большую часть времени проводящих в жилом спальном районе крупного города. Показано, что архитектурный облик жилых районов города и их общественных пространств также отражает «душу» места, его идентичность и способность сформировать у жителей чувство родины.

Список литературы

1. Океанов, Г.В. К вопросу об архитектурной типологии общественного пространства // Приволжский научный журнал. – 2025. – №1 – С. 269–278. – URL: <https://pnj.nngasu.ru/word/articles/1-2025/32.pdf>

2. Усанов, Н.С. Опыт исследования полицентричности городов мира / Н.С. Усанов, И.А. Херувимова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2023. – № 5(48). – С.152–160. – URL: <https://elib.pnzgu.ru/files/eb/image/aJJDPHgNbbvV.pdf>

3. Зиятдинов, З.З. Социальные заказы на реновацию общественных пространств крупных российских городов / З.З. Зиятдинов, С.С. Безруков // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2023. – № 5(48). – С.105–114. – URL: <https://elib.pnzgu.ru/files/eb/image/aJJDPHgNbbvV.pdf>

4. Бабарыкина, Д.В. Российский опыт проектирования общественных пространств всесезонного использования / Д.В. Бабарыкина // Архитектон: известия вузов. – 2025. – №1 (89). – URL: https://archvuz.ru/2025_1/21/
5. Борискина, М.А. Формирование пространств для молодежи в современной городской среде: Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства / М.А. Борискина, И.А. Херувимова // Сборник докладов VII Национальной науч.-практ. конференции. – Пенза, 2024. – С. 122–127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73880854>
6. Айман Наджиб Тома (Маайя). Оценка пешеходного движения в Аммане / Айман Наджиб Тома (Маайя) // Проект Байкал. – 2024. – №3 (81). – С. 146–155. – URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2402>
7. Усанов, Н.С. Роль возрастной дифференциации населения при формировании трансформации общественных пространств / Н.С. Усанов, Е.Г. Лапшина // Наука, образование и экспериментальное проектирование : сборник статей междунар. науч.-практ. конференции. Труды МАРХИ. – Москва, 2024. – С.174–176. – URL: https://marhi.editorum.ru/ru/nauka/conference_article/11429/view
8. Буйнов, А. Непрерывность развития архитектурного образа города / А. Буйнов, А. Казарян // Проект Байкал. 2024, №3 (81). – С. 138–145. – URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2401>
9. Даниленко, К.А. Облик города в историческом развитии / К.А. Даниленко, Е.Г. Лапшина // Реабилитация жилого пространства горожанина: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. им. В. Татлина / под общ. ред. Е.Г. Лапшиной. – Пенза : ПГУАС, 2025. – С.155–158. – URL: https://pguas.ru/images/pdf/tatlin/2025/sbornik_konferencii/Tatlin_2025_сайт.pdf
10. Белорыбкин, Г.Н. История города Пензы : монография : в 2 т. Том 1 / Г.Н. Белорыбкин, С.В. Белоусов, В.А. Власов, Г.В. Гарбуз, А.А. Грачев, А.А. Гущин, Н.С. Ермаков, О.В. Колпакова, А.Д. Левина, Д.Ю. Мурашов, В.Н. Паршина, В.И. Первушкин, О.Ф. Приказчикова, Г.Н. Рябова, В.В. Ставицкий. – Пенза : Областной издательский центр, 2024. – 688 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67925066>

References

1. Okeanov, G.V. On the issue of architectural typology of public space / G.V. Okeanov // Volga Scientific Journal. – 2025. – No. 1 – P. 269–278. – URL: <https://pnj.nngasu.ru/word/articles/1-2025/32.pdf>
2. Usanov, N.S. Experience in the study of polycentricity of the cities of the world / N.S. Usanov, I.A. Cherubimova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2023. – № 5(48). – P.152–160. – URL: <https://elib.pnzgu.ru/files/eb/image/aJJDPHgNbrV.pdf>
3. Ziyatdinov, Z.Z. Social orders for renovation of public spaces of large Russian cities / Z.Z. Ziyatdinov, S.S. Bezrukov // Education and science in the modern world. Innovation. – 2023. – № 5(48). – P.105–114. – URL: <https://elib.pnzgu.ru/files/eb/image/aJJDPHgNbrV.pdf>
4. Babarykina, D.V. Russian experience in designing public spaces for all-season use / D.V. Babarykina // Architecton: izvestiya vuzov. – 2025. – №1 (89). – URL: https://archvuz.ru/2025_1/21/
5. Boriskina, M.A. Formation of spaces for youth in a modern urban environment: Actual problems of theory and practice in various sectors of the national economy / M.A. Boriskina, I.A. Cherubimova // Collection of reports of the VII National Scientific and Practical Conference. – Пенза, 2024. – P. 122–127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73880854>
6. Ayman Najib Toma (Maaya). Assessment of pedestrian traffic in Amman / Ayman Najib Toma (Maaya). // Baikal Project. – 2024. – №3 (81). – P. 146–155. – URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2402>

7. Usanov, N.S. The role of age differentiation of the population in shaping the transformation of public spaces / N.S. Usanov, E.G. Lapshina // Science, education and experimental design : Collection of articles of the international scientific and practical conference. The works of MARKHA. – Moscow, 2024. – P.174–176. – URL: https://marhi.editorum.ru/ru/nauka/conference_article/11429/view

8. Buinov, A. Continuity of the development of the architectural image of the city / A. Buinov, A. Kazaryan // Baikal project. – 2024. – №3 (81). – P. 138–145. – URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2401>

9. Danilenko, K.A. The appearance of the city in historical development / K.A. Danilenko, E.G. Lapshina // Rehabilitation of a citizen's living space : mater. XXI International Scientific and Practical Conference named after V. Tatlin / under the general editorship of E.G. Lapshina. – Penza : PGUAS, 2025. – P.155–158. – URL: https://pguas.ru/images/pdf/tatlin/2025/sbornik_konferencii/Tatlin_2025_site.pdf

10. Belorybkin, G.N. The history of the city of Penza : The monograph : in 2 vol. Volume 1 / G.N. Belorybkin, S.V. Belousov, V.A. Vlasov, G.V. Garbuz, A.A. Grachev, A.A. Guschin, N.S. Ermakov, O.V. Kolpakova, A.D. Levina, D.Yu. Murashov, V.N. Parshina, V.I. Pervushkin, O.F. Prikazchikova, G.N. Ryabova, V.V. Stavitsky. – Penza : Regional Publishing Center, 2024. – P. 688. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67925066>

УДК 721.012:624.011.1

DOI 10.54734/20722958_2026_1_165

*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**Герасимов Владимир Петрович**,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Дизайн»
E-mail : am_dialog@inbox.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**Gerasimov Vladimir Petrovich**,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head. the department «Design»
E-mail: am_dialog@inbox.ru

ТИПОЛОГИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

В.П. Герасимов

Выполнен анализ малых архитектурных форм, изготавливаемых с использованием древесных материалов. Обоснована необходимость систематизации информации в связи с усложнением и расширением форм, технологий, дизайна МАФ, выполненных с применением древесных материалов. Описаны типологические схемы малых архитектурных форм на основе древесины, учитывающие разнообразие свойств конструкционных материалов и форм изделий. Показано влияние технологии изготовления изделий на их восприятие в архитектурной среде.

Ключевые слова: архитектурная среда, малые архитектурные формы, типология, материалы на основе древесины, технология древесных материалов

TYPOLOGY OF SMALL ARCHITECTURAL FORMS MADE OF WOOD-BASED MATERIALS

V.P. Gerasimov

An analysis of small architectural forms made of wood materials is conducted. The need to systematize this information is substantiated due to the increasing complexity and expansion of forms, technologies, and designs of SAF made of wood materials. Typological schemes of SAF based on wood materials are proposed, taking into account the diversity of properties of structural materials and product shapes. The influence of manufacturing technology on product perception in the architectural environment is demonstrated.

Keywords: architectural environment, small architectural forms (SAF), typology, wood-based materials, wood material technology

Введение. Длительное время малые архитектурные формы (МАФ) рассматривались как немаловажный, но все же вторичный элемент архитектурной среды [1, 2]. Известно определение: «Малые архитектурные формы – это сооружения и устройства, обладающие несложными, но самостоятельными функциями, дополняющие архитектуру городских зданий, сооружений, парков, площадей и улиц и являющиеся элементами их благоустройства...» [1]. Там же замечено, что место и роль МАФ может варьироваться от подчинённой функции до главного компонента в восприятии архитектурной среды. Данное определение соответствовало эпохе середины XX века и отражало относительно небольшой ассортимент изделий (ограждения, фонтаны, вазы, павильоны, световые опоры). При этом имели место достаточно высокая художественная выразительность отдельных объектов, а также типизация их форм. Аналитические работы в области малых архитектурных форм, касающиеся в основном типологических и художественных вопросов, появились сравнительно недавно, и это связано, вероятно, с существенным увеличением разнообразия, сложности и ассортимента МАФ в материалах, в художественном воплощении, в конструктивном исполнении [3-6].

В недавнем прошлом МАФ на основе древесины сводились в основном к несложным беседкам, мостикам, ограждениям, скамьям и фигуркам из натуральной древесины (рис. 1).

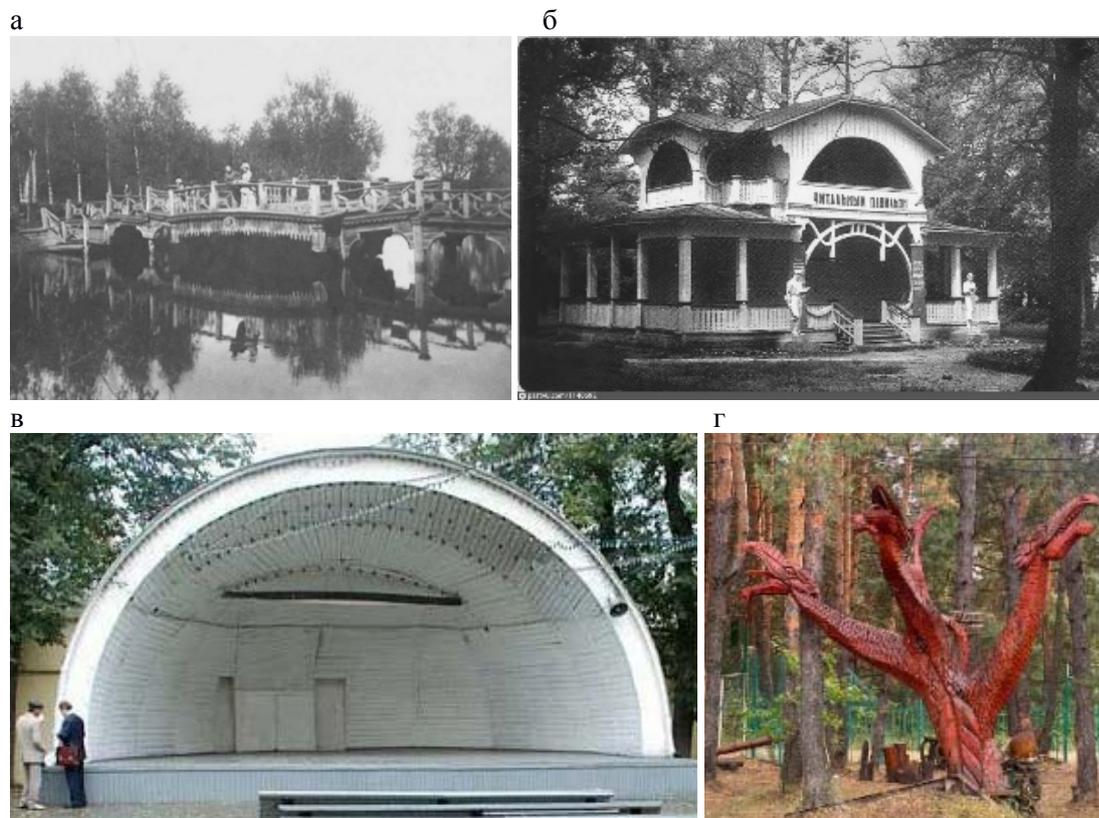


Рис. 1. Примеры традиционных МАФ на основе древесины.
 а – мостик пешеходный в Сердобске Пензенской области (1-я половина XX в.);
 б – парковый павильон в Пензе (1-я половина XX в.);
 в – классическая форма парковой эстрады («ракушка») (1-я половина XX в.);
 г – арт-объект парка Древландия в Пензе (современный объект)

В настоящее время спектр применения МАФ настолько усложнился и расширился, что, с нашей точки зрения, имеется необходимость в упорядочении и систематизации информации, возможно, по отдельным видам материалов, в данном случае – в отношении МАФ на основе древесных материалов.

Историко-технологический аспект. Наиболее значимые технологические разработки в области обработки древесных материалов были получены в конце XIX – начале XX века (изобретения фанеры и клееных конструкций, творчество инженеров (О. Гетцер), архитекторов (А. Аалто и др.)). За последние 50 лет были открыты и внедрены в производство несколько видов материалов и изделий на основе древесины (LVL, OSB, CLT, планкен, ДПК, термодревесина). Начато производство новых видов строительных конструкций с использованием современных материалов, в том числе в России. Создается соответствующая нормативная база [7]. Количество и разнообразие малых архитектурных форм на основе новых типов конструкций и материалов из древесины в России (см., например, материалы архиWOOD <https://arwd.ru/>, ALPBAU <https://alpbaу.com/>) и за рубежом увеличивается. Однако материалы, применяемые при изготовлении МАФ в современном строительстве, не систематизированы.

Из знаковых примеров МАФ на основе новых древесных материалов, показывающих их потенциал, выделим наиболее известные и характерные (рис.2). В первом приведённом примере (см. рис. 1) МАФ имеют крупные размеры, что указывает на необходимость уточнения общего определения малых архитектурных форм.

Появление современных модификаций материалов и конструкций провоцирует создание усовершенствованных художественных форм (например навес Metropol Parasol, рис. 2,а). И, напротив, не исключена ситуация, когда художественные или функциональные требования способствуют разработке новых видов материалов. Примером такого комплексного решения (технология, конструирование, художественное воплощение) является башня в Урбахе (Германия), выполненная из изначально плоских плит CLT, которым была придана сложная форма с пространственной кривизной, контролируемая технологией сушки панелей (рис. 2,б).



Рис. 2. Примеры оригинальных МАФ на основе новых материалов и технологий:
 а – Севилья, навес на площади Metropol Parasol, Jurgen Hermann Mayer, технология LVL, <https://archello.com/project/metropol-parasol>;
 б – Германия, башня в Урбахе технология LVL, <https://archi.ru/news/83593/kontroliruemaya-deformaciya-v-germanii-postroili-derevyannuyu-bashnyu-vse-izgiby-zaranee-zaprogrammirovali>;
 в – США, Индиана, детская площадка, технология CLT, <https://architizer.com/idea/2593609/>;
 г – Лондон, павильон “The Smile”, технология CLT, <https://materialdistrict.com/article/a-clt-pavilion-to-celebrate-500-years-social-housing/>

Заметим, что даже в простых формах возможны неожиданные решения. Например, повсеместно на детских и спортивных площадках используются МАФ с деревянными опорами, заглублёнными непосредственно в грунт, что, на первый взгляд, противоречит нормам. Тем не менее практика эксплуатации и сертификация продукции доказывают, что надёжность таких сооружений является достаточной, поскольку применяемая в изделиях порода древесины (акация) является исключительно стойкой.

Ниже представлены материалы по систематизации современных МАФ на основе древесины.

Предложения по типологии МАФ на основе древесных материалов. Известными качествами изделий на основе древесины являются их натуральность, экологичность, самовозобновляющееся сырьё, необходимость защиты от воздействия среды (огонь, ультрафиолет, перепады влажности).

Дополнительно выделим качества, важные непосредственно для МАФ:

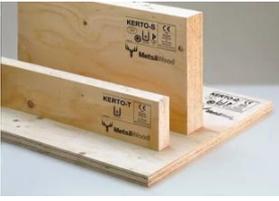
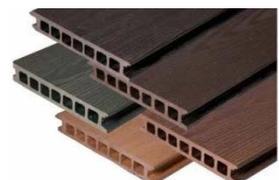
- разнообразие визуального и тактильного восприятия: текстуры (визуальные качества), фактуры обработки поверхностей (тактильные качества);
- богатые возможности формообразования изделий: длинномерных элементов, плоских поверхностей, сложных (искривленных) поверхностей, отдельных предметов.

В табл. 1 приведены материалы на основе древесины и их сравнительные характеристики, имеющие отношение к эксплуатации, изготовлению, художественным особенностям.

Т а б л и ц а 1

Сравнительные характеристики древесных материалов для изготовления МАФ

1	2	3	4	5	6	7	8
Вид изделия	Относительная прочность (условно)	Воздействия, вода, снег, ультрафиолет	Ультрафиолет, огневое воздействие	Соединения отдельных элементов	Изготовление	Особенности	
<p>Натуральная древесина (бревно, брус, доска)</p> 	100 %	Требуется защита	Требуется защита	Нагельные, стыковые, шпонки, шайбы	Заводское, построенное	Экология, натуральность	
<p>Клееная древесина</p> 	105 %	Требуется защита	Требуется защита	Стыковые нагельные, клеенные	Заводское	Прямоугольное сечение, криволинейные (!) и прямолинейные, длина неограниченная	
<p>CLT</p> 	80 %	Требуется защита	Требуется защита	Стыковые нагельные	Заводское	Прочная большеформатная конструкционная плита	
<p>OSB</p> 	30 %	Требуется усиленная защита	Требуется защита	Нагельные	Заводское, построенное	Большеформатная плита	

1	2	3	4	5	6	7	8
Фанера		110 %	Требуется усиленная защита	Требуется защита	Нагельные	Завод	Прочная конструкционная плита ограниченного размера
LVL		120 %	Требуется защита	Требуется защита	Нагельные	Завод	Особо прочная конструкционная плита, линейные элементы
Планкен натуральный		100 %	Требуется защита	Требуется защита	Нагельные, специальные скрытые	Завод	Натуральные линейные элементы до 6 м
ДПК		40 %	Устойчив	Устойчив	Нагельные, специальные скрытые	Заводское	Композитные линейные элементы до 6 м

В табл. 2 представлена иллюстрированная матрица изделий, демонстрирующая разнообразие форм и технологий МАФ на основе древесных материалов.

Одна и та же форма (замысел архитектора) может быть исполнена в различных технологиях. При всей общности архитектурной формы в итоге могут быть получены совершенно разные изделия с точки зрения художественного восприятия (текстура, цвет, тактильность, детали (швы, соединения, узлы крепления)). Эти различия носят общий характер независимо от применяемого материала.

Ниже показаны примеры исполнения одной и той же геометрической формы в различных конструкционных технологиях (сферический купол, гиперболический параболоид) (табл. 3).

На примере простой, но часто встречающейся на практике малой формы – П-образной рамы – показаны конкретные различия в восприятии при создании изделия на основе разных древесных материалов (табл. 4).

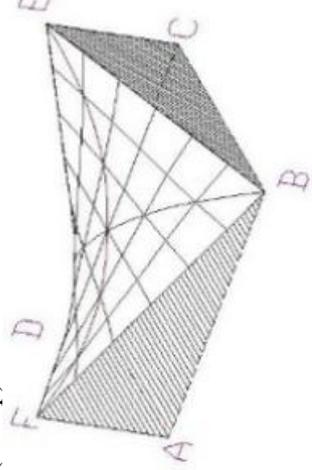
Таблица 2

Типы МАФ в зависимости от типа древесного материала

Материал	ТИП МАФ									
	Скамья	П-образная рама	Арка	Эстрада, навес, пергола	Мостик	Вышка	Арт-объект	Ограждение	Игровые комплекты	Мобильные домики
Древесина натуральная (доска, брус,)										
Древесина натуральная, бревно										
Древесина клееная										
Фанера										
CLT										
LVL										
Древесина модифицированная (ДПК)										
ОСП и панели										
Планкен										

Т а б л и ц а 3

Вариации формы в зависимости от конструктивного исполнения (примеры)

Форма	Конструктивное исполнение		
Купол	Вариант 1. Ребристый, меридионально-кольцевой	Вариант 2. Ребристый, сетчатый, геодезический	Вариант 3. Гладкосетчатый
Гиперболический параболоид (гипар) 	 <p data-bbox="805 817 869 1523">Из прямолинейных элементов (линейчатая поверхность)</p> <p data-bbox="805 181 869 817">Из криволинейных элементов</p>  		

П-образная рама из прямолинейных элементов,
варианты технологического исполнения

Форма	Конструктивное исполнение		
Технология	Вариант 1 КДК	Вариант 2 Фанера, LVL	Вариант 3 CLT
Текстура			
Особенности исполнения и восприятия	Карнизный узел. Текстура фасада – слоистая, тонкие слои по толщине доски	Карнизный узел с разрывом. Текстура фасада – сплошная, лист фанеры, шпон	Карнизный узел без разрыва. Текстура фасада – слои по ширине доски
Визуализация			

ВЫВОДЫ.

1. Новые материалы на основе или в комбинации с древесиной создают неисчерпаемый потенциал для создания малых архитектурных форм.
2. Существенное расширение ассортимента МАФ на основе древесины приводит к необходимости упорядочения типологической информации.
3. Предложены классификации, устанавливающие зависимости между свойствами материалов на основе древесины и типами МАФ.
4. Одна и та же геометрическая форма может быть реализована в разных модификациях древесных материалов и конструкций, что с точки зрения дизайна (внешний вид, тактильность) обогащает палитру решений.
5. Создание новой или корректировка известной формы требует понимания возможностей технологии. Исключением являются случаи создания качественно нового

продукта с заранее заданными свойствами, что диалектически приводит к разработке новых материалов и технологий.

Список литературы

1. Свидерский, В.М. Малые архитектурные формы: ограды, фонари, вазы, скамьи / В.М. Свидерский ; под общ. ред А.М. Касьянова. – Киев : Изд-во Академии архитектуры Укр. ССР, 1953. – 216 с.
2. Малые формы в благоустройстве и застройке городов / под ред. Н.Я. Колли. – ЦНИИП градостроительства, 1964. – 168 с.
3. Самолькина Е.Г. Особенности новейшей деревянной архитектуры в России : автореферат канд. дис. ... / Е.Г. Самолькина. – Нижний Новгород, 2015.
4. Самолькина, Е.Г. Дерево в современной архитектуре малых форм / Е.Г. Самолькина // Vestnik MGSU. – 2015. – №5. – С. 7–17.
5. Алиева Рена Интизар кызы. Малые архитектурные формы в формировании открытых пространств городской среды : автореф. дис. ...канд. наук / Алиева Рена Интизар кызы. – Москва, 2022.
6. Курочкина, В.А. Малые архитектурные формы в структуре открытых общественных пространств города / В.А. Курочкина, Е.К. Калининченко, М.О. Белова. – DOI: 10.15862/28NZVN521 // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/28NZVN521.pdf>.
7. ГОСТ Р 56706-2015. Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев.

References

1. Svidersky, V.M. Small architectural forms: fences, lanterns, vases, benches / V.M. Svidersky ; under total. edited by A.M. Kasyanov. – Kiev : Publishing House of the Academy of Architecture of the Ukrainian SSR, 1953. – 216 p.
2. Small forms in urban improvement and development / edited by N.Ya. Kolli. – TsNIIP Urban Planning, 1964. – 168 p.
3. Samolkina E.G. Features of the latest wooden architecture in Russia : Abstract of the candidate. dis. ... / E.G. Samolkina. – Nizhny Novgorod. – 2015.
4. Samolkina, E.G. Wood in modern architecture of small forms / E.G. Samolkina // Vestnik MGSU. – 2015. – No. 5. – P. 7-17.
5. Alieva Rena Intizar kyzy. Small architectural forms in the formation of open spaces of the urban environment : Abstract of the dis. ... Candidate of sciences / Alieva Rena Intizar kyzy. – Moscow, 2022.
6. Kurochkina, V.A. Small architectural forms in the structure of open public spaces of the city / V.A. Kurochkina, E.K. Kalinichenko, M.O. Belova. – DOI: 10.15862/28NZVN521 // Bulletin of Eurasian Science. – 2021. – Vol. 13. — No. 5. – URL: <https://esj.today/PDF/28NZVN521.pdf>.
7. GOST R 56706-2015. The plates are glued from sawn timber with a cross arrangement of layers.

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой
«Архитектура, реставрация и дизайн»
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: (8421) 48-74-77

Викторова Ольга Леонидовна,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Городское строительство
и архитектура»

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, 6, Miklukho-Maklaya St.

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Candidate
of Historical Sciences, Head of the
Department «Architecture, Restoration and
Design»

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

Olga Leonidovna Viktorova,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department of Urban Construction and
Architecture

АНАЛИЗ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: КОНЦЕПЦИЯ «СДВИГ БАЗОВОЙ ЛИНИИ»

И.Н. Гарькин, О.Л. Викторова

Анализируется возможность применения междисциплинарной концепции «синдрома сдвига базовой линии» в качестве аналитического инструмента для оценки технического состояния и аутентичности объектов культурного наследия. Проводится анализ того, как постепенная и зачастую недокументированная деградация памятников приводит к формированию у каждого нового поколения экспертов, реставраторов и инженеров искаженного представления об их «нормальном» или исходном состоянии. Это когнитивное искажение провоцирует принятие неоптимальных реставрационных решений, направленных на консервацию текущего, уже деградировавшего состояния, вместо восстановления исторически достоверного облика. Предлагается методологический подход к минимизации влияния данного синдрома через создание комплексной, исторически верифицированной «нулевой базовой линии» состояния объекта и внедрение систем долгосрочного мониторинга, ориентированных на сопоставление данных именно с этой эталонной линией, а не с результатами предыдущей инспекции.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, техническое состояние, мониторинг, утрата аутентичности, реставрация, исторические данные, оценка рисков, сохранение наследия, сдвиг базовой линии

RISK ANALYSIS IN ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF CULTURAL HERITAGE SITES: THE BASELINE SHIFT CONCEPT

I.N. Garkin, O.L. Viktorova

This paper examines the potential application of the interdisciplinary concept as an analytical tool for assessing the technical condition and authenticity of cultural heritage sites. It explores how the gradual and often undocumented degradation of monuments leads each new generation of experts, restorers, and engineers to develop a distorted understanding of their «normal» or original condition. This cognitive bias leads to suboptimal restoration decisions aimed at preserving the current, already degraded condition rather than restoring a historically accurate appearance. The paper proposes a methodological approach to minimizing the impact of this syndrome through the creation of a

comprehensive, historically verified «zero baseline» for the site's condition and the implementation of long-term monitoring systems focused on comparing data with this reference line, rather than with the results of a previous inspection.

Keywords: cultural heritage sites, technical condition, monitoring, loss of authenticity, restoration, historical data, risk assessment, heritage conservation, shifting baseline

Сохранение объектов культурного наследия (ОКН) составляет одну из приоритетных задач современного общества, способствуя обеспечению исторической преемственности, сохранению материальных свидетельств культурного и цивилизационного развития. Ключевым этапом организации мероприятий по консервации или реставрации является всесторонняя и объективная оценка технического состояния объекта, которая должна не только опираться на современные методы диагностики, но и учитывать эволюцию исследовательских подходов и стандартизацию критериев оценки [1].

В настоящее время большинство существующих методик оценки технического состояния ОКН акцентируют внимание на протоколировании текущего состояния объекта и сравнительном анализе результатов с предыдущими замерами в рамках структурированной системы мониторинга. Однако подобные подходы содержат методологическую уязвимость, связанную с неявным применением так называемой «базовой линии отсчета». Эта когнитивная ошибка, получившая в научной литературе название «синдром сдвига базовой линии» (shifting baseline syndrome), была впервые выделена в области экологических исследований, в частности при анализе динамики популяций морских организмов. Суть явления заключается в том, что каждое последующее поколение специалистов принимает за точку отсчета и эталонное состояние системы ту ситуацию, которую они застали на момент начала профессиональной деятельности или первых исследований. Постепенно, по мере естественной деградации или трансформации исследуемой системы, исходные ориентиры теряются, а ухудшение состояния воспринимается как новая норма [2, 3].

В контексте сохранения объектов культурного наследия данный эффект проявляется в том, что эксперты и исследователи могут неосознанно принимать за нормативное или удовлетворительное уже видоизменённое, частично утраченной или искажённое состояние памятника, не учитывая реальную степень отклонения от его аутентичного первоначального состояния. В долгосрочной перспективе это приводит к существенному снижению требований к допустимому уровню сохранности, и, как следствие, к прогрессирующей потере культурной ценности. Недооценка истинного масштаба рисков и необходимости вмешательства может стать причиной ошибочного проектирования реставрационных мероприятий и неадекватного распределения ресурсов. Таким образом, представляется актуальным вопрос разработки и внедрения специальных методологических инструментов, позволяющих идентифицировать и корректировать проявления «синдрома сдвига базовой линии» при оценке технического состояния ОКН.

В ходе адаптации указанной когнитивной концепции к условиям работы с объектами культурного наследия был предложен комплексный научно-методический подход к нейтрализации данного эффекта в практике профессиональной деятельности экспертов по сохранению наследия, в основе которого лежат описания возможностей интеграции ретроспективной аналитики, источниковедческого анализа и цифровых методов реконструкции для восполнения дефицита исходных данных и выработки научно обоснованных критериев оценки изменений в структуре и состоянии объектов культурного наследия.

Проблема мониторинга технического состояния объектов культурного наследия заключается в отсутствии единообразной и научно обоснованной базовой точки отсчёта, отражающей исходное состояние объекта. В настоящий момент традиционная практика оценки состояния ОКН носит рутинно-компаративный характер: сравнение данных очередного обследования производится с результатами предыдущих обследований, порой разделённых значительными временными интервалами. При этом наличие лишь несущественных различий интерпретируется в пользу предполагаемой

«стабильности» объекта. Данный подход игнорирует возможность кумулятивного ущерба, накапливающегося в течение длительных исторических периодов [4].

Критически важным недостатком существующих методов является отсутствие непрерывного мониторинга, основанного на данных об аутентичном историческом облике объекта, которые зачастую утеряны либо сильно фрагментарны (например проектно-сметная документация XVIII–XIX веков). Каждая последующая экспертная комиссия или рабочая группа вынуждена ориентироваться не на исходное, а на текущее состояние объекта, зафиксированное её предшественниками. Это приводит к эффекту так называемого «смещения базовой линии»: каждая новая отсчётная точка постепенно инкорпорирует в себя накопленный ущерб, заменяя объективную историческую норму её текущим, зачастую деградировавшим аналогом.

Такое смещение приводит к ряду системных негативных последствий.

– во-первых, происходит институционализированная недооценка темпов и масштабов деградационных процессов. Деформации, разрушения или утраты, которые ранее считались бы критическими или недопустимыми с точки зрения сохранности и подлинности объекта, с течением времени начинают восприниматься как «приемлемые» или «эксплуатационные»;

– во-вторых, нарушается корректность определения категорий технического состояния, что непосредственно влияет на качество экспертных заключений, объём и приоритетность реставрационных мероприятий, эффективность мер по сохранению объекта в долгосрочной перспективе. Отсутствие полноценной исторически обоснованной отправной точки увеличивает вероятность внезапных прогрессирующих разрушений и утрат аутентичных элементов, риски которых систематически занижаются при анализе состояния по «смещённой» базовой линии.

Тем самым недостаточность традиционных подходов мониторинга выражается не только в методологической ограниченности, но и в формировании управленческих решений, неадекватных реальному состоянию объекта, что в долгосрочной перспективе ставит под угрозу само существование культурного наследия как уникального исторического ресурса [5, 6].

Для разрешения выявленной выше проблемы предлагается комплексная методология мониторинга технического состояния объектов культурного наследия, основанная на концепции «Исторической Базовой Линии» (ИБЛ). Введение и нормативное закрепление ИБЛ призвано обеспечить объективность и преемственность оценки изменений технического состояния, минимизируя влияние субъективизма и смещения отсчётной точки. ИБЛ трактуется как формализованное многоуровневое описание состояния объекта в момент его наибольшей конструктивной и эстетической целостности – либо на этапе завершения строительства, либо в зафиксированном архивными источниками периоде до начала существенных деградационных изменений [7].

Реализация данной методологии предполагает поэтапное выполнение работ. На первом этапе осуществляется формирование ИБЛ в соответствии с принципами источниковедческой достоверности и междисциплинарного подхода. Для этого проводятся разносторонние историко-архивные и библиографические исследования, включающие анализ первичных проектных и рабочей документации, письменных описаний, иконографических материалов (гравюр, живописных изображений, ранних фотографий), обследование фонда научно-технической литературы по аналогам. Особое внимание уделяется натурным исследованиям сохранившихся аутентичных элементов и материалов – их физико-механическим, физико-химическим и эксплуатационным характеристикам. На основе интеграции полученных данных формируется эталонная многопараметрическая модель исходного состояния объекта, в частности, с применением технологий информационного моделирования зданий (BIM-модель), позволяющая воспроизводить геометрию, конструктивную схему, свойства и характеристики материалов, полученные в период ИБЛ. Второй этап включает разработку системы количественной оценки ключевых параметров (КП), определяющих техническое состояние конструкций и элементов (прогибы балок, линейные деформации, раскрытие и динамика трещин, изменение влажностного и температурного режима

материалов, степень коррозионных процессов, степень отклонения конструкций от проектного положения, наличие биологических повреждений и пр.) [8]. Для каждого из выделенных параметров устанавливается базовое – исторически обоснованное – значение в условиях ИБЛ, чаще всего принимаемое равным нулю либо рассчитанное аналитически по нормативам времени строительства.

В качестве инновационного элемента методологии вводится количественный показатель – коэффициент сдвига базовой линии $K_{\text{сбл}}$:

$$K_{\text{сбл}} = \frac{\Delta_{\text{ист}}}{\Delta_{\text{тек}}},$$

где $\Delta_{\text{ист}}$ – значение отклонения параметра, зафиксированное на момент последней полной фиксации состояния (устаревшая базовая линия); $\Delta_{\text{тек}}$ – актуальное значение отклонения по отношению к ИБЛ.

Коэффициент $K_{\text{сбл}}$ позволяет формализовать и измерять накопленный эффект смещения точки отсчёта за длительный период эксплуатации. Значение $K_{\text{сбл}}$ близкое к единице характеризует высокую степень смещения базовой линии и, соответственно, систематическую недооценку совокупного ущерба.

Следующий шаг – интеграция результатов в усовершенствованную модель анализа риска R , учитывающую не только скорость изменения параметров, но и кумулятивную величину ущерба, накопленного относительно ИБЛ. Предлагается модифицировать стандартную функцию расчёта риска следующим образом:

$$K = f\left(|\Delta_{\text{тек}}|, \frac{d\Delta}{dt}, K_{\text{сбл}}\right),$$

где $|\Delta_{\text{тек}}|$ – абсолютное отклонение параметра от состояния ИБЛ; $\frac{d\Delta}{dt}$ – скорость его изменения.

В результате объекты или их элементы, демонстрирующие значительный накопленный ущерб, даже при незначительной текущей скорости деградации будут относиться к более высокому классу риска. Это обеспечивает создание эффективной приоритетной системы планирования реставрационных, противоаварийных или консервационных мероприятий на основе объективных количественных критериев.

Реализация предлагаемой методологии не только устраняет дефекты традиционных подходов, но и обеспечивает долговременную преемственность мониторинга, целостность накопления данных и прозрачность принятия управленческих решений на всех этапах жизненного цикла объекта культурного наследия.

Рассмотрим упрощённый пример формализованной оценки технического состояния несущей балки исторического перекрытия с применением предлагаемой методологии, предусматривающей использование понятия ИБЛ.

На основе анализа проектной документации XIX века установлено, что расчётный прогиб балки под действием собственного веса и нормативной постоянной нагрузки составлял $P_0=10$ мм. Данное значение принимается в качестве ИБЛ – эталонного параметра, отражающего нормативное (конструктивно допустимое) состояние элемента на момент завершения строительства. В ходе инструментального обследования, проводившегося в 1990 году, был зафиксирован фактический прогиб балки $P_1=25$ мм. Таким образом, накопленная деформация относительно ИБЛ составила:

$$\Delta_1 = P_1 - P_0 = 15 \text{ мм.}$$

В сопровождающей технической документации обследования и в паспорте объекта в качестве новой точки отсчёта для последующих мониторингов была использована величина P_1 (фактически подменив историческую базовую линию актуализированной (смещённой) базой сравнения). При проведении очередного обследования в 2025 году

было зарегистрировано значение прогиба $P_2=30$ мм. Накопленная деформация по отношению к ИБЛ на данный момент времени составляет:

$$\Delta_2=P_2-P_0=20 \text{ мм.}$$

Традиционный (смещённый) подход основывается на сравнении текущих изменений только относительно непосредственно предшествующего обследования. В данном случае эксперт сопоставляет значения P_2 и P_1 , фиксируя разницу:

$$\Delta_{\text{trad}}=P_2-P_1=30 \text{ мм}-25 \text{ мм}=5 \text{ мм.}$$

Временной интервал между обследованиями составляет $\Delta t=35$ лет, что даёт среднюю скорость изменения:

$$v = \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1} = \frac{5 \text{ мм}}{35 \text{ год}} \approx 0,14 \text{ мм/год.}$$

Согласно сложившейся практике, подобное малое среднегодовое приращение трактуется как незначительное, а техническое состояние балки – как «ограниченно работоспособное» либо «удовлетворительное», что сопровождается выводом о низком уровне риска.

Однако при внедрении подхода, учитывающего ИБЛ, определяется величина кумулятивной деформации относительно исходного проектного состояния, составляющая $\Delta_2=20$ мм, что существенно превышает нормативное значение прогиба и указывает на высокую степень накопленного ущерба.

Для количественной оценки степени смещения точки отсчёта используется коэффициент сдвига базовой линии, определяемый как отношение величины деформации, уже «нормализованной» предыдущей оценкой, к общей накопленной деформации относительно ИБЛ:

$$K_{\text{сбл}} = \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} = \frac{15 \text{ мм}}{20 \text{ мм}} = 0,75,$$

(75 % фактического ущерба уже были инкорпорированы в «новую норму» и не учитывались при последующем мониторинге в качестве отклонения).

Для повышения чувствительности модели к накопленному ущербу модифицируется стандартная формула расчёта риска R , где риск определяется не только средней скоростью изменения параметра v , но и степенью смещения базовой линии $K_{\text{сбл}}$. Пусть зависимость задаётся формулой

$$R = v \cdot (1 + \alpha K_{\text{сбл}}),$$

где α – эмпирический коэффициент, отражающий чувствительность системы мониторинга к эффекту смещения (например $\alpha=2$).

В нашем примере:

$$R_{\text{new}} \approx 0,14 \cdot (1 + 2 \cdot 0,75) = 0,14 \cdot (1 + 1,5) = 0,14 \cdot 2,5 = 0,35 \text{ усл. ед.}$$

Для сравнения в традиционной модели, не учитывающей влияние накопленного ущерба, риск бы оценивался как:

$$R_{\text{old}} \approx 0,14 \cdot 1 = 0,14 \text{ усл. ед.}$$

Таким образом, применение ИБЛ и $K_{\text{сбл}}$ позволяет выявить, что при формально медленном текущем развитии дефекта объект уже находится в существенно ухудшенном состоянии по сравнению с исходной проектной нормой. Это обеспечивает более реалистичную и упреждающую оценку риска, способствуя обоснованию своевременных реставрационных или инженерных мероприятий, направленных на предотвращение критического прогрессирующего разрушения объекта культурного наследия. Эксплицитный учёт исторической нормативной линии в расчетах рисков

способствует формированию новых стандартов мониторинга и управления сохранностью уникальных архитектурных объектов.

Концепция «сдвига базовой линии» представляет собой значимый аналитический инструмент, позволяющий выявлять и количественно корректировать систематические погрешности в процессах мониторинга и диагностики технического состояния объектов культурного наследия. Применение данной концепции способствует формированию объективной картины изменений состояния конструктивных элементов, что, в свою очередь, исключает риск ложного благополучия, обусловленного неполным учётом длительно накопленного ущерба. Игнорирование феномена смещения базовой линии ведёт к деформации управленческих решений, затягиванию необходимого реставрационного вмешательства, а в дальнейшем – к неконтролируемому росту вероятности потери памятников.

На основании проведённого анализа и с учётом недостатков традиционных методик могут быть предложены рекомендации по формированию современной системы мониторинга и управления сохранностью ОКН.

Во-первых, определение и фиксация исторической базовой линии для всех ключевых конструктивных элементов и систем должно стать обязательной неотъемлемой частью обследования, предшествующего формированию программы мониторинга. Установление ИБЛ обеспечивает формирование объективной точки отсчёта, позволяющей оценивать изменения параметров состояния в долгосрочной исторической перспективе, а не только в рамках незначительных межинспекционных интервалов.

Во-вторых, нормативно-методическое сопровождение процессов обследования зданий и сооружений – памятников истории и культуры – должно быть доработано с учётом необходимости двуконтурной оценки: любая периодическая диагностика должна обеспечивать сравнение зафиксированных значений как с состоянием, описанным в предыдущем обследовании, так и с ИБЛ, определяющей конструктивную и историко-архитектурную норму. Введение подобной процедуры повысит преемственность экспертиз, объективность категоризации технического состояния и позволит выявлять кумулятивные (незаметные «по месту») процессы деградации.

В-третьих, при проведении анализа рисков должна применяться усовершенствованная модель, учитывающая не только скорость протекания деградационных процессов (например скорость изменения геометрического или физико-механического параметра), но и объём накопленного ущерба нарастающим итогом по отношению к ИБЛ. Для количественного учёта смещения точки отсчёта рекомендуется использовать коэффициент сдвига базовой линии, показатель, отражающий долю «нормализованного» ущерба, скрытого при традиционном сравнении состояний. Применение этого коэффициента в формулах риска позволит существенно повысить чувствительность системы мониторинга и управления сохранностью ОКН к длительно накапливавшимся изменениям.

В-четвёртых, одной из приоритетных задач развития технической базы мониторинга ОКН становится внедрение цифровых информационных моделей зданий (BIM), где слой ИБЛ должен быть неизменной эталонной записью технического состояния на момент его реконструкции или выявленного наилучшего документированного состояния. Все последующие обследования должны интегрироваться в цифровую модель с обязательной привязкой к слоям: историческому и текущему. Такой подход обеспечивает принципиально новый уровень детализации, простоты визуализации и интероперабельности данных, максимальную преемственность и открытость процедур мониторинга для различных профессиональных сообществ и ведомств.

Совмещённая реализация вышеуказанных положений создаёт предпосылки для формирования единой, научно обоснованной, воспроизводимой и открытой системы мониторинга технического состояния ОКН, что является необходимым условием их устойчивого сохранения, своевременного планирования реставрационных мероприятий и обеспечения инженерной безопасности памятников в долгосрочной перспективе.

Перспективы дальнейших исследований в обозначенной области охватывают ряд ключевых направлений, обладающих значительным потенциалом для развития теоре-

тической базы и практических приложений. Прежде всего следует акцентировать внимание на создании более сложных, многофакторных математических моделей расчёта $K_{\text{сбл}}$, дальнейшей интеграции полученных моделей в систему вероятностной оценки рисков, что позволит повысить точность и воспроизводимость аналитических предсказаний при мониторинге состояния объектов культурного наследия.

Кроме того, существенным этапом валидации и адаптации предлагаемой методологии выступает её апробация на репрезентативном массиве реальных историко-культурных объектов. Это позволит не только накопить необходимый объём эмпирических данных, но и провести калибровку используемых параметров и эмпирических коэффициентов. Таким образом формируется основа для создания обоснованных нормативных подходов к сохранению историко-культурного наследия с учетом специфики различных категорий объектов.

Важным вектором расширения концепции является экстраполяция методологических положений на дополнительные аспекты сохранения культурного наследия, например на оценку степени утраты аутентичности отделочных материалов, на анализ процессов деградации или трансформации исторических ландшафтов в окружении памятников. Эти задачи предполагают внедрение комплексных междисциплинарных подходов, сочетающих методы физико-химического анализа, искусствоведческой экспертизы и ландшафтной экологии.

Особый интерес представляют исследования, направленные на выявление, анализ и моделирование психологических и организационных механизмов, обуславливающих формирование и распространение «синдрома сдвига базовой линии» в профессиональных и экспертных сообществах, занятых вопросами охраны культурного наследия. В данном контексте актуальной задачей становится разработка образовательных программ, рассчитанных на повышение уровня осведомленности специалистов о природе данного феномена и возможных стратегиях преодоления связанных с ним негативных последствий.

Таким образом, обозначенные направления обеспечивают последовательное развитие как фундаментальной, так и прикладной части исследований, способствуя формированию комплексной, научно обоснованной системы управления рисками при сохранении и реставрации объектов культурного наследия.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
2. Гарькин, И.Н. Математическая модель применения риск ориентированного подхода при ремонте сложной кровли объектов культурного наследия / И.Н. Гарькин // Системные технологии. – 2025. – № 2 (55). – С. 92–97.
3. Нуреев, Т.М. Методология создания жилой трёхлучевой объёмнопланировочной структуры / Т.М. Нуреев, А.О. Попов, Д.Т. Нуреева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – № 2 (56). – С. 147–160.
4. Низамов, Р.К. Дом «Михляева-Дряблова». О Петре I, Казани и здании / Р.К. Низамов, А.О. Попов, И.Ю. Матвеев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 3 (49). – С. 34–41.
5. Шеина, С.Г. Системное моделирование организационно-технологической надежности ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия / С.Г. Шеина, Л.С. Сабитов, Д.К.С. Батаев, П.Д. Батаева, Я.Д. Батаева // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 1 (121). – С. 516–526.
6. Камбек, Э. Управление проектом в реставрации на примере работ по восстановлению цистерны Феодосия / Э. Камбек, Е.В. Забелина // Архитектура и строительство России. – 2021. – № 3 (239). – С. 76–83.

7. Селютина, Л.Ф. Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце / Л.Ф. Селютина, Е.И. Ратькова, А.А. Корнеев // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1(54). – С. 186–195.

8. Лапшина, Е.Г. Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2(43). – С. 171–177.

References

1. Garkin, I.N. Historical and architectural value of cultural heritage sites: assessment methods, factorial and historical-genetic analysis / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2025. – N. 1 (62). – P. 192–199.

2. Garkin, I.N. Mathematical model for applying a risk-based approach to repairing complex roofs of cultural heritage sites / I.N. Garkin // System technologies. 2025. N. 2 (55). P. 92-97

3. Nureyev, T.M. Methodology for creating a residential three-beam volumetric-planning structure / T.M. Nureyev, A.O. Popov, D.T. Nureeva // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2021. – N. 2 (56). – P. 147–160.

4. Nizamov, R.K. The Mikhlyayev-Dryablov House. About Peter I, Kazan and the Building / R.K. Nizamov, A.O. Popov, I.Yu. Matveyev // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2019. – N. 3 (49). – P. 34–41.

5. Sheina, S.G. System Modeling of Organizational and Technological Reliability of Repair, Restoration and Reconstruction of Cultural Heritage Sites / S.G. Sheina, L.S. Sabitov, D.K.S. Bataev, P.D. Bataeva, Ya.D. Bataeva // Engineering Bulletin of the Don. – 2025. – N. 1 (121). – P. 516–526.

6. Kambek, E. Project Management in Restoration: The Example of Restoration Work on the Feodosia Cistern / E. Kambek, E.V. Zabelina // Architecture and Construction of Russia. – 2021. – N. 3 (239). – P. 76–83.

7. Selyutina, L.F. Analysis of the state and possibilities of preserving the cultural heritage site in Povenets / L.F. Selyutina, E.I. Ratkova, A.A. Korneev // Regional architecture and engineering. – 2023. – N. 1 (54). – P. 186–195.

8. Lapshina, E.G. Dynamic architecture in the space of a modern city / E.G. Lapshina, Ya.I. Sukhov // Regional architecture and engineering. – 2020. – N 2 (43). – P. 171–177.

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

Карабанова Наталья Юрьевна,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: terramarket58@yandex.ru

Акимова Мария Сергеевна,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: mary-kim16@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

Karabanova Natalia Yurievna,
Candidate of Economics, Associate Professor of
the Department «Real Estate Cadastre and Law»
E-mail: terramarket58@yandex.ru

Akimova Maria Sergeevna,
Candidate of Economics, Associate Professor of
the Department «Real Estate Cadastre and Law»
E-mail: mary-kim16@yandex.ru

«ОРГАНИЧЕСКОЕ» РАЗВИТИЕ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ ГОРОДА В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Н.Ю. Карабанова, М.С. Акимова

Рассматривается проблема перехода к устойчивым моделям развития городской среды, основанным на принципах органического развития, при котором прогресс одной подсистемы не происходит в ущерб другим. Анализируется смена парадигмы градостроительства от жесткого нормирования к гибкому регулированию, ориентированному на потребности и комфорт горожан. Обосновываются современные принципы комплексного развития территорий, представленные в отечественных стандартах, для условий среднего российского города (на примере Пензы). Рассмотрены критерии оценки жилой среды, новые модели застройки и тенденции, направленные на достижение баланса между доступностью жилья, качеством среды и минимизацией антропогенной нагрузки на природные системы. Сделан вывод о необходимости кардинальных изменений в системе управления градостроительной деятельностью для реализации принципов органичного развития.

Ключевые слова: градостроительное планирование, комплексное развитие территорий, органическое развитие, городская среда, качество жизни, доступное жилье, природно-антропогенные ограничения, функциональное зонирование

«ORGANIC» DEVELOPMENT OF RESIDENTIAL CITY AREAS UNDER NATURAL AND ANTHROPOGENIC CONSTRAINTS

N.Yu. Karabanova, M.S. Akimova

This article examines a transition to sustainable urban development models based on the principles of organic development, whereby the progress of one subsystem does not come at the expense of others. It analyzes the shift in the urban planning paradigm from rigid regulation to flexible regulation focused on the needs and comfort of city residents. Modern principles of integrated territorial development, as outlined in national standards, are substantiated for the conditions of the average Russian city (using Penza as an example). The article examines criteria for assessing the residential environment, new development models, and trends aimed at achieving a balance between housing affordability, environmental quality, and minimizing anthropogenic impact on natural systems. The authors come to the conclusion that fundamental changes are necessary in the urban planning management system to implement the principles of organic development.

Key words: urban planning, integrated development of territories, organic development, urban environment, quality of life, affordable housing, natural and anthropogenic restrictions, functional zoning

Введение. Современная мировая практика градостроительства демонстрирует сдвиг от моделей жесткого, директивного планирования к гибкому, рекомендательному регулированию пространственного развития. Новая парадигма ориентирована на формирование уникального городского облика, повышение доступности жилья и создание комфортной, безопасной среды, опирающейся на глубокое понимание потребностей сообществ [1]. Примерами служат стратегии крупных городов, такие, как жилищная стратегия Лондона, которая ставит цели по обеспечению 50 % доступного жилья в новом строительстве и повышению стандартов благоустройства [2].

В этом контексте особую актуальность приобретает концепция органического развития, предложенная М. Месаровичем и Э. Пестелем [4]. Это системное, взаимозависимое и многоаспектное развитие, при котором прогресс одной подсистемы возможен только при условии прогрессивных изменений в других, а качественные преобразования неизменно направлены на повышение благосостояния людей.

В России, где жилые районы долгое время застраивались по унифицированным принципам, назрела необходимость адаптации к меняющимся социально-экономическим условиям и запросам горожан. Сегодня покупатель жилья оценивает не только квадратные метры, но и комплексную среду района: комфорт, безопасность, доступность инфраструктуры, экологию. В связи с этим Минстрой России разработал «Свод принципов комплексного развития городских территорий» – документ, призванный стать инструментом перехода к современным, устойчивым моделям развития.

Целью исследования является обоснование применения современных принципов органического и комплексного развития для совершенствования городской среды среднего российского города в условиях природно-антропогенных ограничений.

Материалы и методы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых в области пространственного развития городов, урбанистики, жилищной политики и экологии городской среды. Среди проанализированных работ выделяется несколько ключевых направлений, задающих рамки методологии данного исследования.

Первое направление – *концепция пространственного роста или сжатия городов*. Так, К.Р. Меркурьева, обосновывая внедрение мастер-планов для проектов комплексного развития территорий, полагает, что их применение будет способствовать улучшению качества городской среды, вертикально расширяя пространство [5, с. 978-990]. Мавлютов Р.Р. пространственное развитие видит в «формировании современной городской агломерации как территории опережающего развития» [6]. Промежуточность между ростом и сокращением города – дисбаланс его структуры. Так, И.В. Манаева обращает внимание на поляризацию городов, что связано с неоднородным распределением ресурсных точек и вызывает неравенство социально-экономических условий в них [7]. Другая группа ученых поднимает проблематику сжатия городов (похожие процессы – «запустение», «гниение», «упадок» и «смерть»). Причины таких процессов связаны преимущественно с социальными факторами, однако достоверные причины разрушения «городских связей» выделить сложно [8]. Нонсенс, что в условиях сжатия в российских городах применяют стратегии роста; имеются только единичные примеры стратегий адаптации к сжатию [9]. Береговских А.Н. рассматривает городской каркас как «живую основу – «результат накопления и выращивания городскими сообществами всех поколений» [10].

Второе направление – *оценка критериев доступности и качества жилья, влияющих на развитие жилых районов города*. Исследователи предлагают различные компоненты для оценки развития микрорайонов, в зависимости от доступности жилья: соотношение доходов, кредиты и жилье, удобства и услуги, безопасность и комфорт, управление качеством и «умный дом» [11]; определение и измерение доступности жилья, жилищная бедность, влияние планирования и зонирования, эконометрический анализ доступности жилья и жилищная политика [12].

Третье направление – *влияние рекреационной нагрузки и сохранение природных территорий в городской черте*. Так, М.А. Слепнев рассматривает воздействие рекреационной нагрузки на природно-антропогенные территориальные комплексы и ее

зависимость от планировочной структуры города. Мероприятия по охране природного комплекса города необходимо прорабатывать при разработке градостроительной документации [13, С. 48-53].

Четвертое направление – *внедрение природоподобных и органических принципов в градостроительство*. Российские исследователи представляют природные компоненты частью «органической архитектуры» города [14, с. 59-70]. Однако во многих городах «наблюдается серьезный дисбаланс между плотностью населения и распределением по территории природного каркаса, озеленения, при этом модель экстенсивного развития является неустойчивой в рамках действующего генерального плана» [15, с. 139-146].

Эмпирическую базу составили:

1. Официальные документы: «Свод принципов комплексного развития городских территорий» (ДОМ.РФ, Минстрой России), ГОСТ Р ИСО 37120-2020.

2. Историко-картографические материалы, отражающие эволюцию планировочной структуры г. Пензы с 1913-го по 2023 г. (генеральные планы, карты, спутниковые снимки).

3. Статистические данные по динамике использования городских земель Пензы за период 2008-2023 гг.

В работе использованы методы сравнительного и ретроспективного анализа, картографический метод, а также статистические данные Росреестра и результаты авторского анализа исторических генеральных планов города Пензы с 1785-го по 2024 год.

Результаты и обсуждение. Для верификации теоретических положений и оценки применимости новых принципов был проведен количественный и картографический анализ исторической динамики г. Пензы.

Анализ картографических материалов и генеральных планов Пензы с 1913-го по 2023 г. (рис. 1, 2) наглядно демонстрирует эволюцию от компактной исторической застройки к экстенсивному, «расползающемуся» росту. Площадь города увеличилась с 290,377 км² в 2008 г. до 310,4 км² в 2023-м, что иллюстрирует продолжение тенденции территориальной экспансии. На рис. 2 представлена структурная диаграмма баланса территорий, где очевидна диспропорция в пользу застроенных и промышленных земель при относительно малой доле рекреационных зон. Это визуально подтверждает выводы Соколовой Н.В. и Литвиновой Я.В. о серьезном дисбалансе в планировочной структуре и дефиците непрерывного природного каркаса в Пензе, особенно в густозаселенных районах.

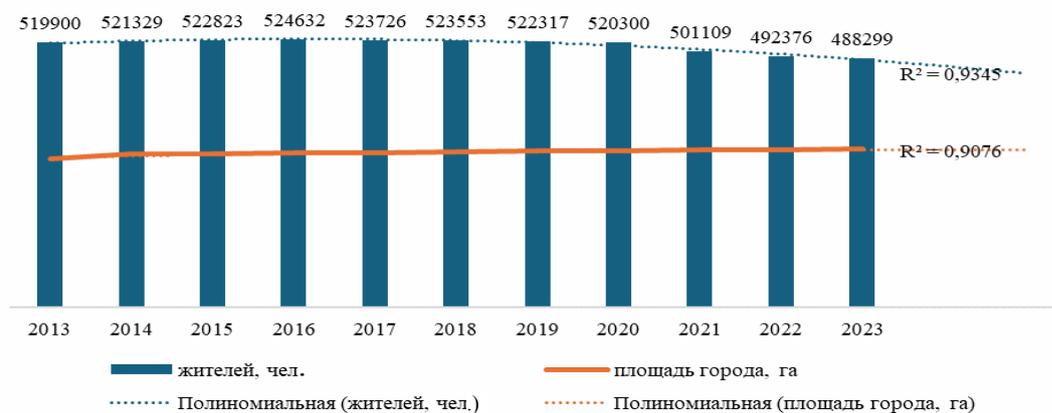


Рис. 1. Динамика изменения численности населения и площади города Пензы

Исследование позволило систематизировать новые требования к развитию жилых районов, выделив ключевые современные тенденции, такие, как создание якорных объектов (парки, технопарки), смешение различных типов жилья, формирование социально-образовательных кластеров, приоритет активного отдыха, а также внедрение «зеленых технологий» и дизайн-кода. Одновременно был определен комплекс крите-

риев для оценки соответствия среды современным стандартам, включающих широкий спектр показателей – от экологических факторов (удалённость от промзон, дорог) и планировочных параметров (плотность, конфигурация) до развитости социальной, транспортной и инженерной инфраструктуры и доступности для маломобильных групп населения.

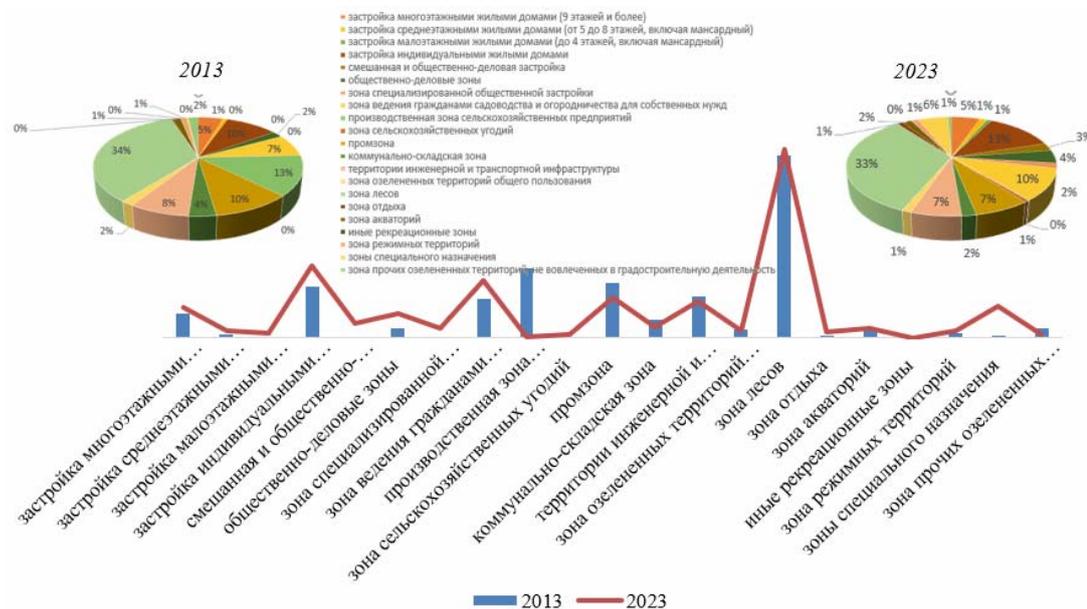


Рис. 2. Динамика и структура баланса территорий г. Пензы

На основе анализа «Свода принципов комплексного развития городских территорий» выделены ключевые подходы к проектированию, которые можно рассматривать как инструментарий для перехода к органическому развитию. Важнейшими из них являются:

1. *Принцип конструктора.* Город рассматривается как система районов, состоящих из кварталов. Важна непрерывность городской ткани для комфортного перемещения.
2. *Оптимальный размер квартала.* Для баланса пешеходной и транспортной доступности рекомендуются кварталы со стороной 80–110 м. Крупные кварталы должны быть пронцаемыми за счет внутренних аллей.
3. *Учет климатических факторов.* Застройка должна защищать от зимних ветров и не препятствовать летним сквозным проветриваниям для снижения эффекта теплового острова.
4. *Типологические модели.* Стандарт выделяет три базовых сценария с конкретными параметрами, которые задают вектор для формирования разнообразной и сбалансированной жилой среды (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Основные параметры базовых сценариев (моделей) формирования жилой среды согласно Своду принципов комплексного развития

Параметр	Малоэтажная жилая модель	Среднеэтажная жилая модель	Центральная модель
1	2	3	4
Размер квартала	2–4 га	Оптимально 80–110 м по стороне	До 1,5 га
Плотность жителей	До 80 чел./га	350–450 чел./га	Высокая, определяется этажностью и смешанным использованием

1	2	3	4
Этажность	Малозэтажная (1-4 этажа)	5–9 этажей	9–18 этажей
Плотность застройки	4–6 тыс. кв. м/га	–	–
Обеспеченность парковками	375 мест на 1 тыс. жителей	235 мест на 1 тыс. жителей	Ограниченная, компенсируется развитым транспортом
Ключевые планировочные особенности	Плотная застройка для эффективного использования инфраструктуры. Автономность (локальные источники энергии, очистные)	Развитая сеть общественного транспорта. Обеспечение доступности социальной инфраструктуры и природных территорий	Смешанная застройка (жилье + коммерция). Разветвленная сеть пешеходных и автомобильных связей. Компактность
Приоритетный тип транспорта	Пешеходная и личная автомобильная доступность	Общественный транспорт, пешеходное движение	Пешеходное движение, общественный транспорт, каршеринг
Целевое назначение	Создание комфортной, камерной среды с высокой автономией. Пригородные или периферийные зоны	Формирование основного жилого фонда города с хорошей транспортной связанностью	Создание активных, многофункциональных городских центров с высокой плотностью деятельности

Примечание. «←» означает, что параметр не является ключевым или определяющим для данной модели.

Для более глубокого понимания исторических корней современных проблем был проведён количественный анализ функционального зонирования города за 240 лет – от первого регулярного плана 1785 года до современного состояния в 2024 году (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Динамика изменения площадей функциональных зон г. Пензы (составлена авторами на основе анализа исторических генеральных планов и данных Росреестра)

№ п/п	Показатель	1785 г.	1893 г.	1927 г.	2024 г.
1	Общая площадь города, кв. км	3,2	20,6	47,7	310,4
2	Площадь застроенной территории, всего, кв. км	2,1	9,9	11,2	86,6
2.1	в т.ч. зона многоэтажной жилой застройки (9+ этажей)	–	–	–	16,07
2.2	в т.ч. зона среднеэтажной жилой застройки (5-8 этажей)	–	–	0,4	3,9
2.3	в т.ч. зона малоэтажной жилой застройки (до 4 этажей)	0,4	1,5	2,9	2,07
2.4	в т.ч. зона индивидуальной жилой застройки	1,7	8,4	7,9	38,4
3	Производственные зоны, кв. км	–	0,56	1,5	47,1
4	Зоны рекреационного назначения (парки, скверы), кв. км	–	0,15	4,1	10,7
5	Земли сельскохозяйственного назначения в границах города, кв. км	–	1,5	1,1	0,7

Анализ табл. 2 позволяет выявить несколько ключевых трендов, характеризующих инерционную модель пространственного развития Пензы на протяжении более двух столетий. Прежде всего обращает на себя внимание беспрецедентный экстенсивный рост территории города, площадь которого увеличилась почти в 97 раз – с 3,2 кв. км в 1785 году до 310,4 кв. км в 2024-м. Наиболее резкий скачок произошёл в XX-XXI веках, что отражает переход от компактного исторического поселения к современной агломерационной форме с активным включением обширных периферийных и пригородных земель. Параллельно шла глубокая трансформация жилого фонда: если в конце XVIII века доминировала индивидуальная усадебная застройка, занимавшая около 80 % застроенной территории, то к настоящему времени кардинально выросла роль многоэтажных жилых массивов, площадь которых достигла 16 кв. км, в то время как до середины XX века они практически отсутствовали. Ещё одной определяющей чертой стало активное формирование и последующая экспансия промышленных зон: отсутствуя в структуре города в 1785 году, к 2024-му они заняли уже 47,1 кв. км, что составляет более 15 % всей городской территории, и заложили основу индустриального каркаса, нередко развивавшегося без должного учёта экологических и социальных последствий. При этом осознание ценности рекреации как системной функции оказалось запоздалым: специальные зоны отдыха начали выделяться лишь с конца XIX века (0,15 кв. км в 1893 году), и даже к 2024 году их доля в общей структуре города остаётся крайне невысокой — около 3,4 %, что указывает на исторически сложившийся и до сих пор не преодоленный дефицит качественных, доступных общественных пространств.

Сопоставление выявленных исторических трендов развития Пензы с принципами, заложенными в «Своде принципов» (см. табл. 1), позволяет выявить системные расхождения, препятствующие переходу к органической модели (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Соответствие исторически сложившейся структуры г. Пензы принципам органического развития

Принцип / Тренд органического развития	Ситуация в г. Пензе (на основе анализа табл. 2 и картографических материалов)	Выявленная проблема / расхождения
Полицентризм, смешанное использование территорий	Чёткое функциональное зонирование, разобщённость спальных, промышленных и рекреационных районов. Дефицит общественных центров в периферийных районах	Монофункциональность районов, ведущая к маятниковой миграции и перегруженности транспортного каркаса
Оптимальный размер квартала, проницаемость	Наличие крупногабаритных, изолированных микрорайонов советской постройки и обширных зон индивидуальной застройки с низкой связностью	Нарушение принципа «непрерывности городской ткани», снижение пешеходной доступности и безопасности
Приоритет развития общественных пространств и рекреации	Низкая доля рекреационных зон (3,4 % в 2024 г.), их неравномерное распределение, особенно в густозаселенных районах	Дефицит качественной среды для отдыха и социализации, что снижает комфортность проживания
Сбалансированное развитие подсистем	Гипертрофированный рост промышленных зон (15 % территории) при отставании в развитии социальной и рекреационной инфраструктуры	Нарушение системной взаимозависимости, рост антропогенной нагрузки на среду при дефиците компенсирующих функций

Ретроспективный анализ подтверждает, что пространственное развитие Пензы на протяжении большей части своей истории носило ярко выраженный экстенсивный и монофункциональный характер, направленный на количественный рост и приоритетное размещение жилой и промышленной застройки. Эта исторически сложившаяся структура является ключевым вызовом для перехода к органическому развитию.

Конкретным примером проявления описанных системных проблем является жилой район Шуист. Анализ его планировочной структуры выявил:

- отсутствие якорного общественного центра, дефицит объектов повседневного обслуживания;
- разрозненную застройку (сочетание МКД и ИЖС) с плохо организованной пешеходной и транспортной внутрирайонной сетью;
- неорганизованность дворовых пространств, отсутствие благоустроенных общественных зон.

В рамках предлагаемого подхода органического развития, ревитализация подобного района могла бы осуществляться не через дальнейшую экстенсивную застройку, а через точечную имплантацию якорного объекта (например, многофункционального культурно-спортивного центра), вокруг которого началось бы формирование нового общественного центра района. Это будет способствовать повышению связности, оживлению социальной жизни и, как следствие, повышению инвестиционной привлекательности и качества среды, реализуя на практике принцип прогресса одной подсистемы (социальной инфраструктуры) для запуска позитивных изменений в других (качество жилой среды, экономическая активность).

Реализация описанного подхода в условиях российских городов сталкивается с рядом барьеров.

1. *Экологические.* Необходимость минимизации рекреационной нагрузки на природные комплексы сочетается со сложностями градостроительного регулирования городских лесов (прямые запреты Лесного кодекса на застройку), что ограничивает инструментарий развития зеленого каркаса.

2. *Управленческие.* Существующая система управления градостроительной деятельностью требует перехода от точечных решений к гибкой модели «стратегия – тактика – регулирование – перенастройка», ориентированной на долгосрочное сбалансированное развитие.

3. *Планировочные.* Наследие устаревших норм и сложившаяся монофункциональная структура городов создают инерцию, противоречащую принципам проницаемости, человеческого масштаба и смешанного использования территорий.

Таким образом, «Свод принципов комплексного развития городских территорий» предлагает необходимый методический инструментарий, однако его имплементация требует преодоления как объективных природно-антропогенных ограничений, так и глубокой трансформации системы градостроительного планирования и управления.

Заключение и выводы. Проведенное исследование позволило обосновать необходимость перехода к модели органического развития городских территорий как ответа на вызовы современной урбанизации. На основе комплексного анализа теоретических концепций, современных нормативных документов и ретроспективного кейса г. Пензы были сделаны следующие выводы:

1. Концепция органического развития, трактуемая как системное, взаимозависимое и многоаспектное преобразование городских подсистем, направленное на устойчивое повышение качества жизни, является методологической основой для преодоления дисбалансов, унаследованных от инерционной, экстенсивной модели градостроительства.

2. «Свод принципов комплексного развития городских территорий» представляет собой актуальный инструментарий для перехода к модели органического развития городов для этого перехода. Систематизированные в исследовании принципы конструктора оптимального размера и проницаемости квартала, учёта климата и три базовые типологические модели (малоэтажная, среднеэтажная, центральная) задают

конкретные ориентиры для формирования комфортной, сбалансированной и многофункциональной жилой среды.

3. Ретроспективный анализ г. Пензы наглядно продемонстрировал разногласия между современными требованиями и унаследованной планировочной структурой. Количественные данные (рост площади города в 97 раз, доля промышленных зон >15 % при доле рекреации ~3,4 %) и картографические материалы подтвердили доминирование экстенсивной, монофункциональной модели, приведшей к фрагментации городской ткани, дефициту общественных пространств и нарушению принципа системной взаимозависимости подсистем.

4. Ключевым барьером на пути реализации принципов органического развития являются не только природно-антропогенные ограничения, но и институциональная инерция системы градостроительного управления. Для её преодоления необходима кардинальная трансформация – переход от точечного регулирования к гибкой модели стратегического планирования («стратегия – тактика – регулирование – перенастройка»), способной обеспечить сбалансированное и адаптивное развитие всех городских подсистем.

Таким образом, органическое развитие предстает не как утопическая идея, а как прагматичная и необходимая парадигма, требующая переосмысления градостроительной политики, пересмотра нормативной базы и консолидации усилий профессионального сообщества, органов власти и жителей для создания подлинно устойчивых, комфортных и жизнеспособных городских сред.

Список литературы

1. IHS Regional Housing Market Segmentation Analysis / Institute for housing studies at DePaul University. – June, 2017. – 18 p.
2. The London Strategic Housing Land Availability. Assessment 2017. Greater London Authority. – November 2017. – 268 p.
3. Housing review of 15 countries in Europe and Central Asia: affordability, livability, sustainability / Habitat for Humanity. – 146 p.
4. Mesarovic, M. Mankind at the Turning Point – The Second Report of the Club of Rome / M. Mesarovic, E. Pestel, N.D. Karunaratne // Economic Analysis and Policy. – 1976. – Vol. 6 (3). – P. 69–73.
5. Меркурьева, К.Р. Пространственное планирование на основе мастер-плана как нового вида градостроительной документации / К.Р. Меркурьева // International agricultural journal. – 2022. – №6. – С. 978–990.
6. Мавлютов, Р.Р. Пространственное развитие крупных городов России в период постиндустриального перехода : монография / Р.Р. Мавлютов. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2015.
7. Манаева, И.В. Пространственное развитие городов России: теория, анализ, моделирование : монография / И.В. Манаева, С.Н. Растворцева. – Белгород : ИД «БелГУ» НИУ «БелГУ», 2021. – 196 с.
8. Wolff, M. Urban Growth and Decline: Europe's Shrinking Cities in a Comparative Perspective 1990–2010 / M. Wolff, T. Wiechmann // European Urban and Regional Studies. – 2018. – Vol. 25, No 2. – P. 122–139.
9. Гунько, М.С. Стратегии планирования в условиях городского сжатия в России: исследование малых и средних городов / М.С. Гунько, Ю.А. Еременко, Е.Ю. Батунова // Мир России. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 121–141.
10. Береговских, А.Н. Живая основа пространственного развития города / А.Н. Береговских // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : сборник научных трудов РААСН : в 2 т. Т. 1. – Москва : РААСН, 2021. – С. 192–199.

11. Esruq-Labin, A.M.J. Criteria for Affordable Housing Performance Measurement : A Review / A.M.J. Esruq-Labin, A.I. Che-Ani, N.M. Tawil [et al.]// E3S Web of Conferences. – 2014. – Vol. 3. – 01003.
12. Li, J. Recent trends on housing affordability research: where here are we up to? / J. Li // Urban Research Group – CityU on Citi Working Paper Series. – 2014. – WP No.5. – 21 p.
13. Слепнев, М.А. Значение рекреационной нагрузки при функциональном зонировании природно-антропогенных территориальных комплексов / М.А. Слепнев // Экология урбанизированных территорий. – 2017. – № 4. – С. 48–53.
14. Кубецкая, Л.И. Закономерности природных процессов в развитии градостроительных систем / Л.И. Кубецкая, Н.О. Кудрявцева // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 1. – С. 59–70.
15. Соколова, Н.В. К вопросу о стратегии пространственного развития города Пензы / Н.В. Соколова, Я.В. Литвинова // Градостроительство и архитектура. – 2020. – Т. 10, № 2 (39). – С. 139–146.

References

1. IHS Regional Housing Market Segmentation Analysis / Institute for housing studies at DePaul University. – June, 2017. – 18 p.
2. The London Strategic Housing Land Availability. Assessment 2017. Greater London Authority. – November 2017. – 268 p.
3. Housing review of 15 countries in Europe and Central Asia: affordability, livability, sustainability / Habitat for Humanity. – 146 p.
4. Mesarovic, M. Mankind at the Turning Point – The Second Report of the Club of Rome / M. Mesarovic, E. Pestel, N.D. Karunaratne // Economic Analysis and Policy. – 1976. – Vol. 6 (3). – P. 69–73.
5. Merkurjeva, K.R. Spatial planning based on the master plan as a new type of urban planning documentation / K.R. Merkurjeva // International agricultural journal. – 2022. – No. 6. – P. 978–990.
6. Mavlyutov, R.R. Spatial development of large Russian cities during the post-industrial transition : monograph / R.R. Mavlyutov. – Volgograd : VolgGASU, 2015.
7. Manaeva, I.V. Spatial development of Russian cities: theory, analysis, modeling : monograph / I.V. Manaeva, S.N. Rastvortseva. – Belgorod : BelSU Publishing House of BelSU, 2021. – 196 p.
8. Wolff, M. Urban Growth and Decline: Europe's Shrinking Cities in a Comparative Perspective 1990–2010 / M. Wolff, T. Wiechmann // European Urban and Regional Studies. – 2018. – Vol. 25, No 2. – P. 122–139.
9. Gunko, M.S. Planning Strategies in the Context of Urban Compression in Russia: A Study of Small and Medium-Sized Cities / M.S. Gunko, Yu.A. Eremenko, E.Yu. Batunova // Mir Rossii. – 2020. – Vol. 29, No. 3. – P. 121–141.
10. Beregovskikh, A.N. The Living Basis of Urban Spatial Development / A.N. Beregovskikh // Fundamental, Exploratory, and Applied Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN) on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning, and the Construction Industry of the Russian Federation in 2020 : Collection of Scientific Papers of the RAASN : in 2 vol. Vol. 1. – Moscow : RAASN, 2021. – P. 192–199.
11. Esruq-Labin, A.M.J. Criteria for Affordable Housing Performance Measurement : A Review / A.M.J. Esruq-Labin, A.I. Che-Ani, N.M. Tawil [et al.]// E3S Web of Conferences. – 2014. – Vol. 3. – 01003.
12. Li, J. Recent trends on housing affordability research: where here are we up to? / J. Li // Urban Research Group – CityU on Citi Working Paper Series. – 2014. – WP No.5. – 21 p.

-
13. Slepnev, M.A. The importance of recreational load in the functional zoning of natural and anthropogenic territorial complexes / M.A. Slepnev // Ecology of urbanized territories. – 2017. – No. 4. – P. 48–53.
 14. Kubetskaya, L.I. Patterns of natural processes in the development of urban planning systems / L.I. Kubetskaya, N.O. Kudryavtseva // Academia. Architecture and Construction. 2023. – No. 1. – P. 59–70.
 15. Sokolova, N.V. On the issue of the strategy for spatial development of the city of Penza / N.V. Sokolova, Ya.V. Litvinova // Urban planning and architecture. – 2020. – Vol. 10, No. 2 (39). – P. 139–146.

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

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Ганизода Шахромидини Низомиддин,
магистрант
E-mail: gsia@pguas.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

Derina Maria Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Urban Construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the Department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Ganizoda Shahromiddini Nizomiddin,
Master
E-mail: gsia@pguas.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, Ш.Н. Ганизода

Дана комплексная оценка существующей городской среды, основанная на природно-климатической, ландшафтно-архитектурной, экономической и технической составляющих. Определены эффективные способы функционального зонирования городских территорий по установленным критериям. Проанализирована целесообразность размещения городских объектов на разных участках с учетом первоначальных инвестиций и эксплуатационных расходов. Предложены рекомендации по реализации архитектурно-строительных проектов, обобщающие информацию, полученную на этапе изучения существующей городской среды.

Ключевые слова: городская среда, архитектурно-строительное проектирование, функциональное зонирование, комплексная оценка, климат, ландшафт

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE URBAN ENVIRONMENT FOR DESIGNING

M.A. Derina, L.N. Petryanina, Sh.N. Ganizoda

A comprehensive assessment of the existing urban environment is carried out, based on natural, climatic, landscape, architectural, economic and technical components. Effective ways of functional zoning of urban areas according to established criteria are determined. The expediency of placing urban facilities on different sites is analyzed, taking into account initial investments and operating costs. Recommendations for the implementation of architectural and construction projects are proposed, summarizing the information obtained at the stage of studying the existing urban environment.

Keywords: urban environment, architectural and construction design, functional zoning, integrated assessment, climate, landscape

Современное жилищное строительство часто не использует весь потенциал окружающей природы для улучшения качества жизни: недостаточно учитываются возможности использования природных ресурсов для комфортного проживания, а также необходимость защиты от негативного воздействия на человека. Чтобы исправить эту ситуацию, были проанализированы и систематизированы существующие примеры успешного учета природных факторов в строительстве и планировке городов. Цель исследования – разработать модели и рекомендации, которые помогут архитекторам и

проектировщикам более эффективно использовать природные условия при создании жилых комплексов, обеспечивая комфорт и экологическую устойчивость городской среды.

На основании изучения, анализа и обобщения результатов исследования природных условий и антропогенных факторов на проектируемой территории была сформирована комплексная оценка существующей городской среды, основанная на природно-климатической, ландшафтно-архитектурной, экономической и технической составляющих.

Оценка экологической пригодности каждого участка рассматриваемой территории выполнена по результатам анализа ландшафта, климата и санитарных условий. На основе этой оценки были выявлены эффективные способы использования территории, исходя из установленных критериев:

- способность отдельных зон территории (рощ, экотонов и т.п.) обеспечить защиту;
- экологическое состояние территории и её способность к самообновлению;
- типы объектов, определяющие текущее использование территории (жилые и коммерческие постройки, сельхозугодья);
- экологические риски и проблемы, возникающие в результате освоения территории под жилую застройку, и их влияние на жизнеспособность экосистемы.

Анализ территории по предложенным критериям позволил провести функциональное зонирование, выделив участки: с нетронутой природой и её охраняемыми зонами; оптимальные для аграрной деятельности; особо ценные природные массивы (леса, поля); предназначенные для застройки и интенсивного освоения; а также уже застроенные территории, где требуется рекультивация природных компонентов.

В составе экологической оценки проведена проверка санитарно-гигиенического состояния, интегрирующая информацию о микроклиматических условиях и антропогенных факторах. Целью этой оценки было определение общего уровня санитарно-гигиенического состояния среды и выявление оптимальных вариантов использования каждого участка территории. Основные критерии оценки:

- степень комфорта и привлекательности открытых пространств, обусловленная микроклиматом;
- снижение эстетической или функциональной ценности из-за антропогенных факторов.

На основании указанных критериев было выполнено зонирование проектируемой территории с целью выделения участков, различающихся по степени благоприятности. Оценка привлекательности сделана с учетом характеристик микроклимата (солнечная радиация, ветровой и тепловой режимы, туманность) и соответствия экологическим нормативам в отношении загрязнения атмосферы и водных ресурсов, шумового воздействия и электромагнитного излучения.

В отличие от экологической и санитарно-гигиенической оценок ландшафтно-архитектурная оценка не предполагала обязательного зонирования территории по назначению. Ее целью было определение ключевых элементов ландшафта, которые оказывают наибольшее влияние на проектное решение, подчеркивая уникальность как всей территории, так и ее отдельных зон. По своей сути эта оценка носит качественный характер, отражая архитектурный подход к осмыслению пространства.

Известно, что архитектурная композиция ландшафта должна учитывать его природную структуру, чтобы успешно интегрировать новые функции, не нарушая гармонии. Поэтому, в зависимости от исходной структуры, при проектировании застройки ландшафт мог остаться неизменным (стабильная структура), обогатиться и стать более сложным (динамичная структура, стремящаяся к улучшению) или же потерять свою целостность и стать хаотичным (распад структуры).

Очевидно, что чем разнообразнее и выразительнее существующий ландшафт, тем больше возможностей для ландшафтно-архитектурной композиции. Это позволило более гармонично вписывать новый градостроительный объект, устанавливая с ним визуальные взаимосвязи. В отличие от того, монотонный или хаотичный рассматри-

вался ландшафт, он ограничивал возможности, позволяя создавать лишь разрозненные, локальные взаимодействия между постройками и природными элементами. Учитывая это, композиционные приемы, используемые в ландшафте, сгруппировали следующим образом:

– сложный и разнообразный ландшафт, с изрезанной структурой, создающий идеальные условия для разработки выразительных ландшафтно-архитектурных решений; позволяющий гармонично интегрировать застройку в природное окружение на этапе проектирования, учитывая его динамичный характер;

– ландшафт, давно сформированный человеком, характеризующийся стабильностью и специализацией, имеющий при этом «расчлененный» вид; интеграция нового строительства, которое бы не нарушало существующий ландшафт, сохраняя основные черты, затруднена из-за его прочной структуры;

– невыразительный, однородный или хаотичный ландшафт, без четкой структуры, представляющий собой сложную основу для нового строительства; интеграция новых объектов в такой ландшафт затруднена, т.к. установление визуальных и функциональных взаимосвязей между ними и существующими элементами ландшафта требует значительных затрат, а хрупкая организация такого ландшафта легко нарушается при вмешательстве.

Экономическая оценка территории строительства базировалась на комплексном анализе всех проведенных исследований. Целью было определить экономическую целесообразность возведения объектов на разных участках, учитывая как первоначальные инвестиции, так и текущие эксплуатационные расходы. Ключевыми критериями оценки были:

– влияние микроклимата на энергоэффективность зданий и на функциональность прилегающих пространств;

– геологические и гидрологические условия, оказывающие существенное влияние на затраты, связанные с проектированием и устройством фундаментов, а также на выбор и применение строительной техники;

– значение существующих зеленых насаждений и почвенно-растительного покрова в оптимизации затрат на озеленение и последующий уход.

Комплексная оценка среды предусматривала определение участков, обеспечивающих комфортное существование человека и природы, зон, подлежащих охране и регулируемому использованию с обязательной рекультивацией, а также выделение доминирующих ландшафтных компонентов, формирующих его эстетическую ценность.

На основе всестороннего анализа были сформулированы рекомендации по реализации проекта. Эти рекомендации, представленные в удобном для проектировщиков формате, обобщают всю информацию, полученную на этапе изучения существующей среды. Они учитывают предложения по зонированию территории и детально оценивают потенциал и ограничения строительства на каждом участке. Особое внимание уделяется выявлению ключевых факторов (как благоприятных, так и неблагоприятных), которые будут определять назначение участка и выбор методов строительства.

Экологическая оценка может выявить необходимость защиты или восстановления ценных природных и исторических объектов. Ландшафтно-архитектурная оценка поможет учесть особенности рельефа, растительности и водоемов на территории. Экономическая оценка определит наиболее выгодные участки для строительства и использования, а санитарно-гигиеническая – места с благоприятным микроклиматом и низким уровнем загрязнения.

Ограничения, касающиеся строительства, были разделены на «условные» и «безусловные».

Строительство на определенных участках запрещено абсолютными («безусловными») ограничениями. Такие запреты обусловлены неизбежными негативными последствиями (угроза здоровью и безопасности людей, ущерб природе или

значительное увеличение затрат). Эти последствия невозможно полностью устранить с помощью градостроительных мер, но их влияние можно частично смягчить.

Исследование и учет условных ограничений на этапе проектирования и строительства позволяет избежать или минимизировать нежелательные последствия: ущерб для экосистем, неоправданное увеличение затрат и ухудшение санитарных условий. Такие риски могут быть устранены или значительно снижены принятием оптимальных архитектурно-планировочных и строительных решений.

Разработанные рекомендации направлены на создание проектного решения, которое позволит:

- оптимально использовать территорию с учетом ее функциональных и эстетических характеристик;
- провести необходимые инженерные работы для подготовки участка;
- обеспечить безопасность населения и защиту окружающей среды от негативных факторов;
- оценить затраты на освоение, включая мероприятия по улучшению микроклимата, сохранению и восстановлению ландшафта (с учетом его композиционно-эстетических качеств), а также по защите от неблагоприятных и антропогенных воздействий.

Рекомендации по инженерным мероприятиям для подготовки территории направлены на улучшение ее характеристик и пригодности для использования. Это может включать уход за зелеными насаждениями, создание водоемов (запруд) или осушение болот. Часто такие работы связаны с устранением последствий предыдущей человеческой деятельности, например, очисткой водоемов или восстановлением поврежденных ландшафтов. Подобные мероприятия можно проводить до завершения проектных работ, и лучше их выполнять с учетом общего градостроительного плана района, чтобы избежать противоречий с будущими решениями.

Несмотря на то что конкретные рекомендации получены при изучении существующей среды, они должны быть не жесткими рамками, а направлением, позволяющим проектировщику свободно экспериментировать в поиске наилучших архитектурно-планировочных решений для человека и природы.

Для эффективного представления строительных возможностей и ограничений, а также для формирования обоснованных рекомендаций и требований к проектному решению, целесообразно создавать итоговые схемы (карты). Эти схемы должны базироваться на всестороннем анализе и комплексном обобщении имеющихся данных.

Таким образом, шесть схем (карт), полученных в ходе изучения городской среды, являются ключевыми для формирования рекомендаций по проектному решению.

На схеме 1 визуализирована оценка микроклиматических условий проектируемой территории. Она позволяет определить зоны, комфортные для пребывания, и зоны, где микроклимат неблагоприятен. В зонах дискомфорта отмечены участки, где скорость ветра превышает допустимые значения, показаны направления движения холодного воздуха, места его скопления (так называемые «озера» холодного воздуха) и области, подверженные снегоотложению.

На схеме 2 представлена оценка природного ландшафта проектируемой территории, разделенная на три основные категории:

- зоны, подлежащие сохранению, ценные природные объекты, такие, как рельеф, водоемы, растительность, места обитания фауны и экотоны;
- зоны ограниченного использования и рекультивации – участки с природными особенностями, требующими особого подхода, например, слабые грунты, карстовые образования, оползни, трещиноватые скалы, овраги, а также территории с высоким уровнем грунтовых вод и заболоченные участки;
- зоны, не подлежащие сохранению: эта категория включает территории с необратимыми изменениями, такие, как оползни, срезки грунта, карьеры, насыпи, нарушенные берега, вырубки и сельскохозяйственные угодья.

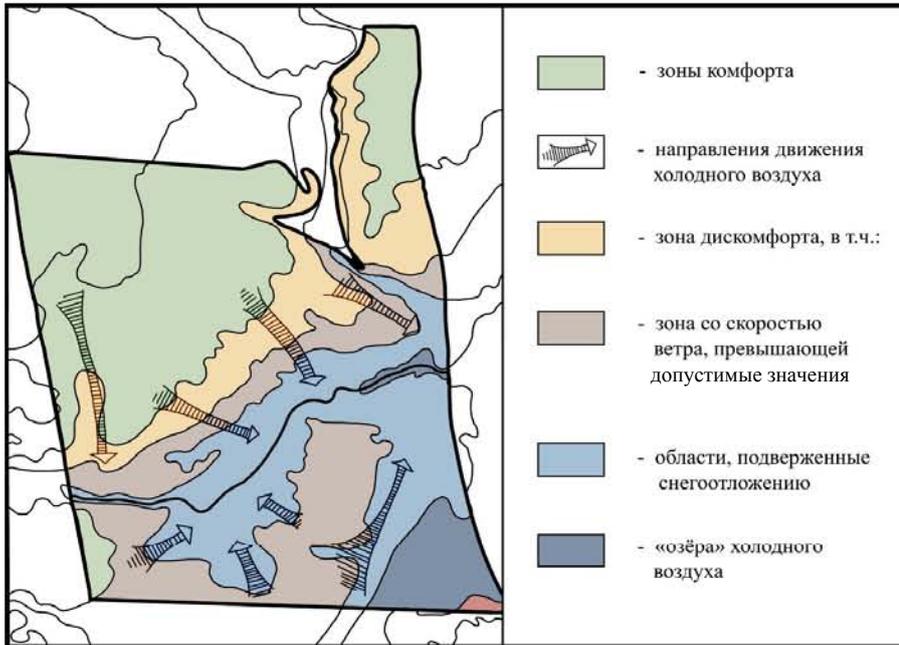


Схема 1. Оценка микроклиматических условий проектируемой территории

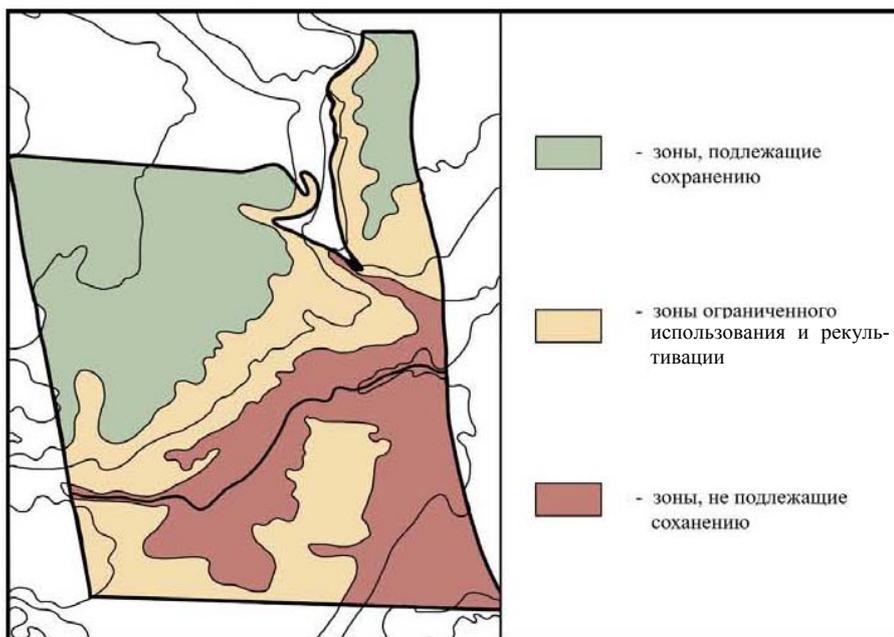


Схема 2. Оценка природного ландшафта проектируемой территории

На схеме 3 представлена ландшафтно-архитектурная оценка территории проектирования, которая отображает:

– ключевые ландшафтные компоненты, формирующие архитектурно-композиционный потенциал: открытые пространства, рельеф (линии уклонов и высотные отметки), растительность, водоемы, историко-культурные объекты с охранными зонами, а также существующие здания и инженерные сооружения; эти элементы классифицируются по их значимости – для всей территории в целом и для отдельных её участков;

– визуальное восприятие проектируемой и прилегающих территорий, включая зоны с широким и ограниченным обзором, а также основные визуальные оси и коридоры.



Схема 3. Ландшафтно-архитектурная оценка территории проектирования

Схема 4 иллюстрирует оценку антропогенных факторов на проектируемой территории. На ней выделяются зоны комфортного и дискомфортного состояния окружающей среды. В зоне дискомфорта показываются участки превышения допустимых уровней шума, вибрации и концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, а также участки загрязнения почвы и водоемов.

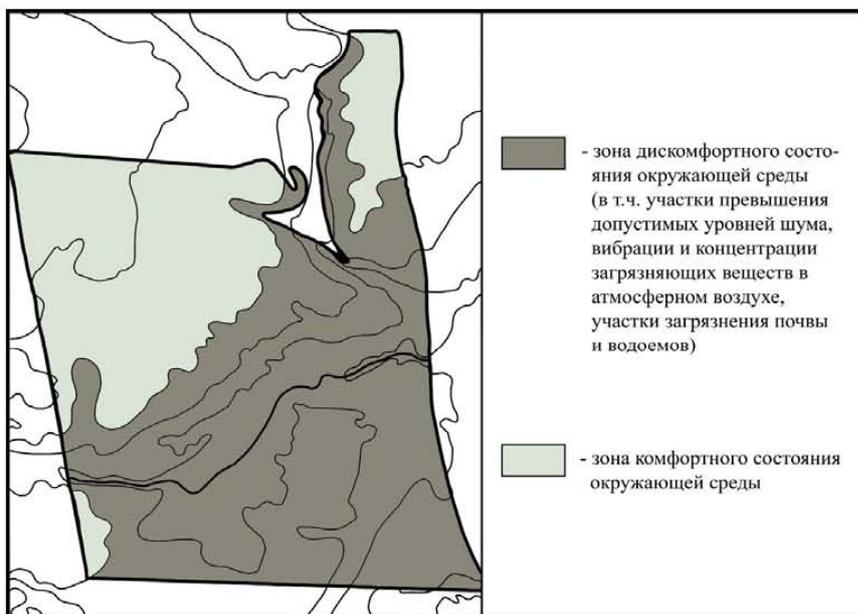


Схема 4. Оценка антропогенных факторов на проектируемой территории

На схеме 5 наглядно представлена комплексная оценка проектируемой территории, на ней показаны:

- зоны охраняемого ландшафта, включая ценный экотон (например, с помощью цветового выделения);
- зона ограниченного использования, требующая рекультивации (с указанием масштаба работ);
- ведущие элементы ландшафта, определяющие его архитектурный потенциал (например, с помощью условных обозначений);
- охранные зоны памятников истории и культуры (с указанием границ);

- зоны микроклиматического дискомфорта (с использованием изотерм или других графических элементов);
- зона антропогенного дискомфорта (с указанием источников загрязнения или других негативных факторов);
- существующие и сохраняемые здания и инженерные сооружения (с обозначением их типа).



Схема 5. Комплексная оценка проектируемой территории

На схеме 6 представлен предлагаемый план освоения территории. На нем обозначены зоны, предназначенные для возведения жилых домов и общественных объектов, а также участки для организации активного и пассивного отдыха. Схема отражает мероприятия по улучшению микроклимата, такие, как защита от ветра и снегозаносов. Предусмотрены работы по созданию искусственных водоемов, осушению заболоченных участков и снижению негативного влияния человека на природу (например, за счет создания выемок, разработки карьеров и озеленения).

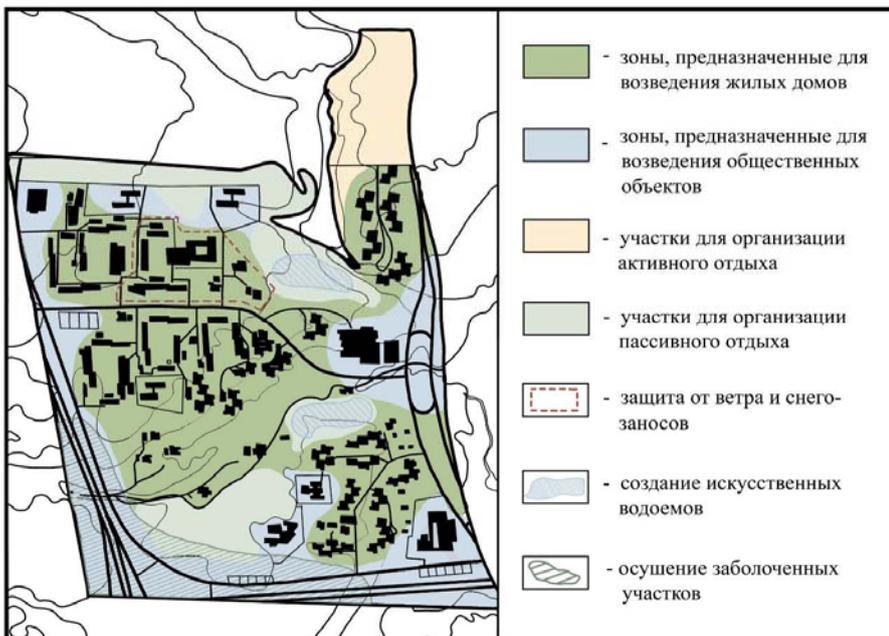


Схема 6. Предлагаемый план освоения территории

В ы в о д ы

1. Проведен анализ и обобщены результаты исследования природных условий и антропогенных факторов на проектируемой территории для формирования комплексной оценки существующей городской среды.
2. Предложена комплексная оценка среды, предусматривающая определение участков, обеспечивающих комфортное существование человека и природы в городском пространстве.
3. Установлено, что учет условных ограничений на этапе проектирования и строительства позволит избежать или минимизировать нежелательные результаты принятием оптимальных архитектурно-планировочных и строительных решений.
4. Разработаны рекомендации по реализации проекта, обобщающие информацию, полученную на этапе изучения существующей городской среды.

Список литературы

1. Беляева, Л.О. Оценка комфортности городской среды / Л.О. Беляева, К.И. Стрелец // Русский журнал строительных наук и технологий. – 2023. – № 1. – С.33–35.
2. Гусев, А.Д. Инвестиционная привлекательность использования отходов резинотехнических изделий / А.Д. Гусев, М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Международный научный журнал. – 2020. – №6. – С.30–36.
3. Дерина, М.А. Применение индустриальных стеновых конструкций в различных природно-климатических условиях / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №2(43). – С.120–126.
4. Нотман, О.В. Индексный метод оценки качества городской среды: международный и российский опыт / О.В. Нотман // Вестник АГУ. – 2021. – №2. – С.89–99.
5. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.
6. Яськова, Н.Ю. Комплексный подход к формированию качественной городской среды / Н.Ю. Яськова, В.И. Сарченко, С.А. Хиревич // Недвижимость: экономика, управление. – 2020. – №2. – С.12–21.

References

1. Belyaeva, L.O. Assessment of the comfort of the urban environment / L.O. Belyaeva, K.I. Strelets // Russian Journal of Building Sciences and Technologies. – 2023. – No. 1. – P.33–35.
2. Gusev, A.D. Investment attractiveness of using waste rubber products / A.D. Gusev, M.A. Derina, L.N. Petryanina // International Scientific Journal. – 2020. – No. 6. – P.30–36.
3. Derina, M.A. Application of industrial wall structures in various natural and climatic conditions / M.A. Derina, L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2(43). – P.120–126.
4. Notman, O.V. Index method of urban environment quality assessment: international and Russian experience / O.V. Notman // Bulletin of ASU. – 2021. – No. 2. – P.89–99.
5. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Yu.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1(42). – P.212–217.
6. Yaskova, N.Yu. An integrated approach to the formation of a high-quality urban environment / N.Yu. Yaskova, V.I. Sarchenko, S.A. Hirevich // Real estate: economics, management. – 2020. – No. 2. – P.12–21.

