

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

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

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова

Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован

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

Свидетельство о регистрации

ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

36946 в каталоге Роспечати

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

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

Подписано к печати 14.06.2024.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 28.0. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 117.

Дата выхода в свет 28.06.2024.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 1200 руб.

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
2(59)/2024**

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

Обухова С.Ю., Королев Е.В., Будкина А.О.
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО
В ПРИСУТСТВИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ
ЧАСТЬ 2: ОПРЕДЕЛЕНИЕ
РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ 5

Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Макридин Н.И.
ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫЕ
ВЫСОКОПРОЧНЫЕ
И СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ
И ТЕКСТИЛЬБЕТОНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
ПРОЧНОСТИ 13

Гарькина И.А., Данилов А.М.
ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ:
РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ 22

Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Бурьянов А.Ф.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА
КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ
И СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ..... 30

Логанина В.И., Карпова О.В.
КИНЕТИКА СТАРЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ
ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КАЧЕСТВА
ИХ ВНЕШНЕГО ВИДА 47

Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н.
РЕСУРСООРИЕНТИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА..... 53

Жегера К.В., Лавров И.Ю., Трошев Д.В.
ОПТИМИЗАЦИЯ СИНТЕЗА
НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ СМЕСИ
3D-ПРИНТЕРА 60

Логанина В.И., Рыжов А.Д.
ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКОЙ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ
АЛЮМОСИЛИКАТОВ..... 66

© Авторы публикаций, 2024

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2024

© ПГУАС, 2024

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА С ВАРИАЦИЕЙ СТРУКТУРЫ И ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ СИНТЕЗЕ МАТЕРИАЛА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ..... 73	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 157
Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Малашкіна С.А. РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА АСФАЛЬ- ТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ 81	Кузина В.В., Кошев А.Н., Пономарева И.К., Еремкин А.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА ОТ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 157
Выродова К.С., Ядыкина В.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУНГИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО И АСФАЛЬТОБЕТОНА 89	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА, ВСПЛЫВАЮЩИХ В ЧИСТОЙ ВОДЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ 164
Береговой В.А., Лавров И.Ю. ЭПОКСИДНЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЕТОНА И РЕМОНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .. 100	Продоус О.А., Шлычков Д.И., Шестаков А.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗНЫХ МЕТОДИК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИЗНОШЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С ВНУТРЕННИМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ 175
Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Киселев Е.В. ПОЛУЧЕНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА ЕГО ПРОЧНОСТИ С ПОЗИЦИЙ МИКРОМЕХАНИКИ КОМПОЗИТА 110	Баканова С.В., Фролов М.В. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ..... 184
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 117	
Селяев В.П., Куприяшкіна Л.И., Бабушкіна Д.Р., Бусаргин Д.А. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА С УЧЕТОМ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ..... 117	АРХИТЕКТУРА..... 189
Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК С НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРОЙ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ 126	Плешивцев А.А., Король Е.А., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. АРХИТЕКТУРНО-БИОНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОТОБРАЖЕНИЮ ФУНКЦИЙ И ФОРМ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ 189
Снежкіна О.В., Корнюхин А.В. РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ..... 134	Ванюшкін А.С. СИСТЕМА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕАТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЕДИНИЦ..... 195
Шени А.И., Чуманов А.В. СИСТЕМА ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕХОВ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВЫХ ГАСИТЕЛЕЙ С ГИДРОЦИЛИНДРАМИ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ 143	Береговой А.М. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В МАЛОЭТАЖНОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ ИЗ РАЗНОТИПНЫХ ЗДАНИЙ, ПОДКЛЮЧЕННЫХ К СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА 209
Ласьков Н.Н., Болдырева О.В., Лаврова О.В. ПРОЧНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПРИГОДНОСТЬ ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК..... 149	Дерина М.А., Петряніна Л.Н., Шамина М.П. ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА УЧРЕЖДЕНИЙ ДОШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ 1960–80-Х ГОДОВ 215

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Tarasov R.V., Makarova L.V., Malashkina S.A. RISK-ORIENTED APPROACH IN ENSURING THE QUALITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES AND ROAD SURFACES BASED ON THEIR BASIS	81
Obukhova S.Yu., Korolev E.V., Budkina A.O. STRUCTURE FORMATION OF A MODIFIED BINDER IN THE PRESENCE OF RUBBER CRUMB PART 2: DETERMINATION OF FORMULATION AND TECHNOLOGICAL FACTORS IN TWO-STAGE TECHNOLOGY....	5	Vyrodova K.S., Yadykina V.V. THE USE OF SHUNGITE TO IMPROVE THE QUALITY OF POLYMER-BITUMEN BINDER AND ASPHALT CONCRETE.....	89
Yerofeyev V.T., Tarakanov O.V., Makridin N.I. POWDER-ACTIVATED HIGH-STRENGTH AND ULTRA-HIGH-STRENGTH FIBER AND TEXTILE CONCRETES OF A NEW GENERATION WITH IMPROVED STRENGTH INDICATORS.....	13	Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu. EPOXY COMPOUNDS FOR CONCRETE PROTECTION AND REPAIR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.....	100
Garkina I.A., Danilov A.M. EXPERIENCE IN COMPOSITES DESIGN: RETROSPECTIVE ANALYSIS	22	Cherkasov V.D., Emelyanov A.I., Kiselev E.V. PRODUCTION OF NON-AUTOCLAVE FOAM CONCRETE FROM DRY MIXTURES AND ASSESSMENT OF ITS STRENGTH FROM THE POINT OF COMPOSITE MICROMECHANICS	110
Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Buryanov A.F. THE USE OF PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF MULTICOMPONENT BINDERS AND SULFOALUMINATE CEMENTS	30	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	117
Loganina V.I., Karpova O.V. PAINT COATINGS AGING KINETICS DEPENDING ON THEIR APPEARANCE QUALITY	47	Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Babushkina D.R., Busargin D.A. THE MECHANICS OF CONCRETE DESTRUCTION, TAKING INTO ACCOUNT THE FRACTAL PROPERTIES OF THE STRUCTURE	117
Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N. RESOURCE-BASED TECHNOLOGY FOR PRODUCING CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON STEELMAKING SLAG	53	Zamaliyev F.S., Filippov D.Y. NUMERICAL INVESTIGATIONS OF PRESTRESSED STEEL CONCRETE BEAMS WITH STRESSED REINFORCEMENTS WITHOUT BONDING WITH CONCRETE	126
Zhegera K.V., Lavrov I.Y., Troshchev D.V. OPTIMIZATION OF THE SYNTHESIS OF A NANOSTRUCTURING ADDITIVE FOR USE IN THE WORKING MIXTURE OF A 3D PRINTER	60	Snezhkina O.V., Korniyukhin A.V. DEVELOPMENT OF DOMESTIC METHODS OF CALCULATING THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS ON AN INCLINED SECTION	134
Loganina V.I., Ryzhov A.D. PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF LIME COATINGS WITH ADDITIVES BASED ON SYNTHETIC ALUMINOSILICATES	66	Shein A.I., Chumanov A.V. THE SYSTEM OF CROSS-LINKS OF PRODUCTION WORKSHOPS BASED ON BAND-ROPE DAMPERS WITH ONE-SIDED ACTION HYDRAULIC CYLINDERS UNDER SEISMIC INFLUENCES	143
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. TECHNOLOGIES OF SYSTEM ANALYSIS WITH VARIATION OF STRUCTURE AND VALUES OF MODEL PARAMETERS IN THE SYNTHESIS OF A MATERIAL AS A COMPLEX SYSTEM.....	73	Laskov N.N., Boldyreva O.V., Lavrova O.V. DURABILITY AND SERVICEABILITY OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS	149

ENGINEERING SYSTEMS	157	ARCHITECTURE	189
Kuzina V.V., Koshev A.N., Ponomareva I.K., Eremkin A.I. DETERMINATION OF CONVECTIVE FLOW PARAMETERS FROM A HEATER BY MATHEMATICAL MODELING METHOD	157	Pleshivtsev A.A., Korol E.A., Sabytov L.S., Garkin I.N. ARCHITECTURAL AND BIONIC APPROACH TO DISPLAYING FUNCTIONS AND FORMS OF ARCHITECTURAL OBJECTS	189
Andreev S.Y., Belova L.V., Lebedinskiy K.V. THEORETICAL ANALYSIS OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIR BUBBLES FLOATING IN CLEAN WATER IN VARIOUS MODES	164	Vanyushkin A.S. THE SYSTEM OF TOPOLOGICAL CHARACTERISTICS AS THE BASIS FOR FORMING CREATIVE SPATIAL UNITS	195
Prodous O.A., Shlychkov D.I., Shestakov A.A. COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS OF HYDRAULIC CALCULATION OF WORN-OUT METAL WATER SUPPLY NETWORKS WITH INTERNAL DEPOSITS	175	Beregovoy A.M. ENERGY SAVING IN LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS OF DIFFERENT TYPES, CONNECTED TO AN AUTOMATIC HEAT CONTROL SYSTEM.....	209
Bakanova S.V., Frolov M.V. EVALUATION OF AIR COOLING EFFECTIVENESS.....	184	Derina M.A., Petryanina L.N., Shamina M.P. GENERAL PLANNING STRUCTURE OF PRESCHOOL EDUCATIONAL INSTITUTIONS BUILT IN THE 1960S AND 80S	215

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.16

DOI 10.54734/20722958_2024_2_5

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00

Обухова Светлана Юрьевна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Будкина Ангелина Олеговна,
аспирант
E-mail: Angelina-line@yandex.ru

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

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00

Obukhova Svetlana Yurievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Budkina Angelina Olegovna,
Postgraduate
E-mail: Angelina-line@yandex.ru

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

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
Scientific Work

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО В ПРИСУТСТВИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ ЧАСТЬ 2: ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.Ю. Обухова, Е.В. Королев, А.О. Будкина

Представлен опыт разработки научно-обоснованного технологического решения по получению стабильного резино-битумного вяжущего (РБВ), которое предусматривает предварительный процесс девулканизации резиновой крошки в углеводородном пластификаторе в присутствии стабилизирующего агента и последующее приготовление РБВ. Приведена методика приготовления дисперсных систем «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» и РБВ. Установлены рецептурно-технологические факторы для получения РБВ двухстадийным способом: продолжительность процесса приготовления резиносодержащего компонента – 3 ч, подходящий углеводородный пластификатор – отработанное масло, девулканизирующий агент – синтетический воск.

Ключевые слова: резиновая крошка, битум, пластификатор, совместимость

STRUCTURE FORMATION OF A MODIFIED BINDER IN THE PRESENCE OF RUBBER CRUMB

PART 2: DETERMINATION OF FORMULATION AND TECHNOLOGICAL FACTORS IN TWO-STAGE TECHNOLOGY

S.Yu. Obukhova, E.V. Korolev, A.O. Budkina

The article is devoted to developing science-based technological solution for obtaining crumb rubber modified bitumen (CRMB) with stable properties. The technological solution provides a preliminary process of devulcanization of rubber crumb in hydrocarbon plasticizer in the presence of stabilizing agent and subsequent preparation of CRMB. In the second part of the work the methods of preparation of dispersed systems «hydrocarbon plasticizer – crumb rubber» and CRMB are developed. The following factors have been established for obtaining CRMB by two-stage technology: duration of the process of the rubber component preparation – 3 h, suitable hydrocarbon plasticizer – waste oil, devulcanizing agent – synthetic wax.

Keywords: rubber crumb, bitumen, plasticizer, compatibility

Введение

Необходимость повышения долговечности и безопасности асфальтобетонных автомобильных покрытий в современных условиях интенсивного развития дорожной сети и роста транспортных нагрузок сохраняет научную актуальность и практическую значимость. Для улучшения качества асфальтобетонных дорог используют модифицированные битумные вяжущие. Резиновая крошка, полученная измельчением использованных автомобильных покрышек, является перспективным модифицирующим компонентом для битумных материалов. Актуальной проблемой в данной области остается получение стабильного резино-битумного вяжущего с устойчивой структурой и стабильными свойствами. Для решения данной проблемы научное сообщество предлагает проводить предварительную обработку резиновой крошки в пластификаторах, которые должны характеризоваться высоким соотношением парафино-нафтяных веществ, наличием асфальтенов и, как правило, более низкой вязкостью [1, 2]. Тем не менее проблема диспергирования и равномерного объемного распределения модификаторов как в среде-носителе, так и в модифицируемой матрице битумного вяжущего сохраняется [3, 4].

Также важной проблемой остается неконтролируемость завершения процесса девулканизации, что может привести к получению конечного композита нестабильного качества. Ингибитором и стабилизатором данного процесса может выступать парафин, молекулы которого при введении в завершающей стадии приготовления будут обволакивать набухшую частицу резиновой крошки и формировать переходную оболочку, препятствующую последующей адсорбции ею масел из битумного вяжущего. Также это будет способствовать более равномерному распределению резиновой крошки в объеме композита. Таким образом, станет возможным достижение контролируемого процесса девулканизации.

Наше исследование посвящено разработке научно-обоснованного технологического решения по получению резино-битумного вяжущего, обладающего повышенными эксплуатационными свойствами. Очевидно, что достижение цели исследования обеспечит повышение долговечности асфальтобетона и сопутствующие экономические эффекты.

Материалы и методы исследований

В качестве исследуемых материалов использовались:

- резиновая крошка (РК ЧРЗ 0,5), полученная методом дробления и измельчения пневматических шин легковых транспортных средств;
- экстракт нефтяной остаточный средневязкий;
- масло отработанное промышленное;
- транс-полиоктеномерный каучук, произведенный на основе циклооктена;
- синтетический воск, полученный синтезом Фишера – Тропша;

– нефтяной дорожный битум марки БНД 50/70.

Подробное описание исследуемых материалов приведено в 1-й части статьи [5].

Методика приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» заключается в следующем. Пластификатор заливается в емкость с герметичной крышкой, в которую погружаются смеситель и датчик контроля подвода тепла. Включается смеситель со скоростью 100–300 об/мин, и начинается подогрев дисперсной системы до температуры 210 °С. По достижении заданной температуры в емкость с пластификатором при скорости перемешивания 300 об/мин постепенно вводится резиновая крошка в течение 10–15 минут. Емкость герметично закрывается, и фиксируется начало процесса девулканизации, который длится не более 6 часов. Отбор проб осуществляется каждый час.

Процесс девулканизации резиновой крошки, сопровождаемый увеличением исходного объема (набуханием) в процессе приготовления, изучали посредством определения группового углеводородного состава, *динамической вязкости* и *сдвиговой вязкости* дисперсной системы в период приготовления.

Для определения динамической вязкости использовался ротационный реометр Rheolab QC с контролируемой скоростью сдвига, работающий по принципу Серле, который основан на вращающихся концентрических цилиндрах. Для определения сдвиговой вязкости использовался динамический реометр сдвига DSR, работающий по принципу регулируемой деформации сдвига с целью измерения свойств текучести. Определение сдвиговой вязкости осуществлялось с применением геометрии (двух дисков), где диаметр площадки равен 25 мм. На ротационном реометре температура испытания – 135 °С, скорость сдвига 30 с⁻¹. На динамическом реометре температура испытания аналогична – 135 °С, $G^*/\sin \delta \geq 1 \text{ кПа}$. Для каждого процентного содержания резиновой крошки готовится и испытывается не менее 3 образцов.

Равномерность распределения резиновой крошки в объеме углеводородного пластификатора оценивалась с помощью метода флуоресцентной микроскопии на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2.

Методика приготовления *резино-битумного вяжущего (РБВ)* заключается в следующем (рис. 1). Необходимое количество дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» и битум заливаются в емкость с герметичной крышкой, в которую погружается смеситель якорного типа и датчик контроля подвода тепла. Включается смеситель со скоростью 100–300 об/мин, и начинается подогрев системы до температуры 190 °С. По достижении 190 °С осуществляется перемешивание компонентов системы на скорости перемешивания 300 об/мин в течение часа. На втором этапе понижается температура системы до 175 °С и в емкость при скорости перемешивания 300 об/мин постепенно вводится девулканизирующий компонент в течение 2–3 минут. Затем емкость закрывается, и система с девулканизирующим агентом перемешивается в течение 15 минут при 175 °С и скорости перемешивания 300 об/мин. По завершении приготовления резино-битумного вяжущего емкость снимается с нагревательной плитки и осуществляется остывание системы до комнатной температуры при периодическом помешивании РБВ стеклянной палочкой.

После приготовления исследуемых образцов резино-битумного вяжущего осуществляется проверка динамической вязкости на ротационном вискозиметре. В случае если динамическая вязкость была менее 3 Па·с при температуре испытаний 135 °С, то приступали к установлению основных зависимостей свойств. Если вязкость была более 3 Па·с, тогда образец не использовался в дальнейших испытаниях. Выбранное значение динамической вязкости обусловлено технологическими особенностями и требованиями, установленными в ГОСТ Р 58400.1-2019 для всех битумных вяжущих.

Установление зависимости влияния рецептурно-технологических факторов резинового модификатора на параметры структуры и свойств модифицированного битумного вяжущего – резинобитумного вяжущего (РБВ) – осуществляется с применением методов, указанных в ГОСТ Р 58400.1-2019. Блок-схема исследовательского подхода данной работы показана на рис. 2.



Рис. 1. Схематичное изображение методики приготовления резино-битумного вяжущего

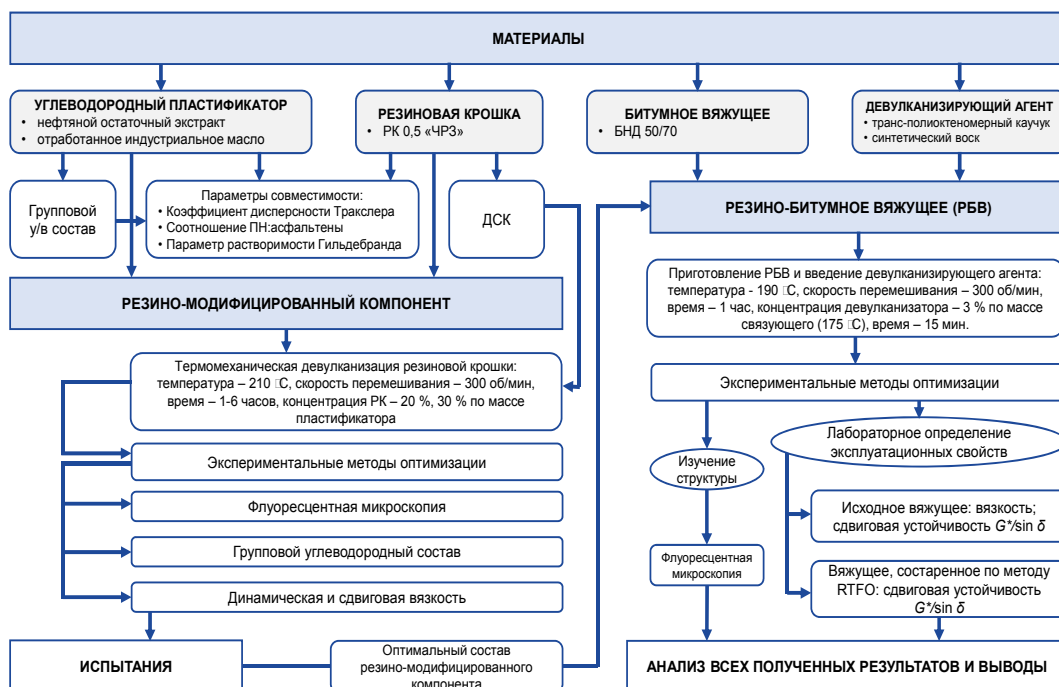


Рис. 2. Блок-схема исследовательского подхода

Результаты и обсуждение

Для подбора режима приготовления дисперсных систем «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» и изучения процесса девулканизации были приготовлены составы (табл. 1) и изучены их реологические свойства.

Т а б л и ц а 1

Составы дисперсных систем «углеводородный пластификатор – резиновая крошка»

Номер состава	Наименование компонента дисперсной системы, %		
	Экстракт остаточный средневязкий	Отработанное масло промышленное	Резиновая крошка РК ЧРЗ 0,5
1	100	-	20
2	100	-	30
3	-	100	20
4	-	100	30

При подборе режимов исследования дисперсной системы №1 «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» на ротационном вискозиметре не было получено стабильных результатов ввиду наличия в последних эластичных компонентов, затрудняющих получение стабильных данных. В связи с чем для определения условий исследования динамической вязкости РБВ необходимо провести значительное количество тестирований, что согласуется с существующими исследованиями в этой области [6, 7] и представляет собой очень сложный и трудоемкий процесс. Поэтому дальнейшие исследования реологических характеристик дисперсных систем осуществляли с помощью определения сдвиговой вязкости на динамическом реометре сдвига (рис. 3).

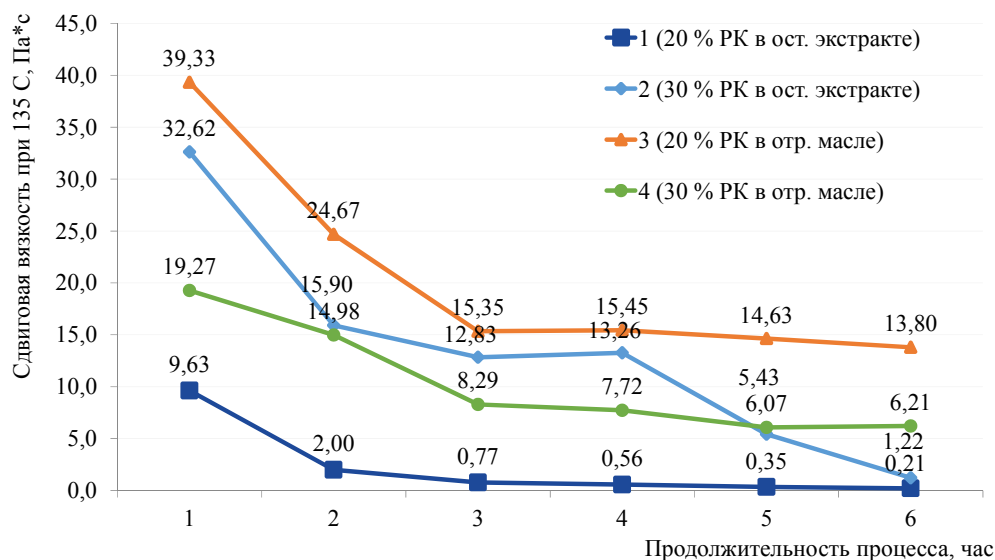


Рис. 3. Сдвиговая вязкость для дисперсных систем, составы №1 – №4

Оптимальной продолжительностью приготовления для всех исследуемых дисперсных систем (составы №1–№4) с различным процентным содержанием резиновой крошки является то время, когда сдвиговая вязкость дисперсных систем достигает асимптотических величин, то есть кривые вязкости выходят на «плато», что свидетельствует о максимальной степени снижения упругости резиновой крошки, связанной с процессом девулканизации, который приводит к частичному разрушению ее структуры. Результаты измерения сдвиговой вязкости (см. рис. 3) показывают, что в результате термомеханического воздействия достижение «плато» для всех исследуемых систем происходит после трех часов. Дальнейшее термомеханическое воздействие не является эффективным.

Для практического применения наиболее перспективным является максимально наполненные концентраты дисперсных систем «углеводородный пластификатор – резиновая крошка». Поэтому равномерность распределения оценивали в системах с 30 %-м содержанием резиновой крошки; результаты представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что в образце, приготовленном с отработанным маслом, после трех часов термомеханического воздействия наблюдается «разрыхленная» структура резиновой крошки, что свидетельствует о происходящем процессе девулканизации. Он заключается в частичной деструкции резины, вследствие чего происходит локальное разрушение ее пространственной структуры. То есть уменьшается густота связей пространственной сетки за счет распада части поперечных связей и некоторой части основных молекулярных цепей. В образце, приготовленном с экстрактом остаточным, данного эффекта не наблюдается, что также отразилось на полученных более низких значениях по сдвиговой вязкости (см. рис. 3). Поэтому далее в исследовании зависимостей свойств резино-битумных вяжущих он не рассматривался.

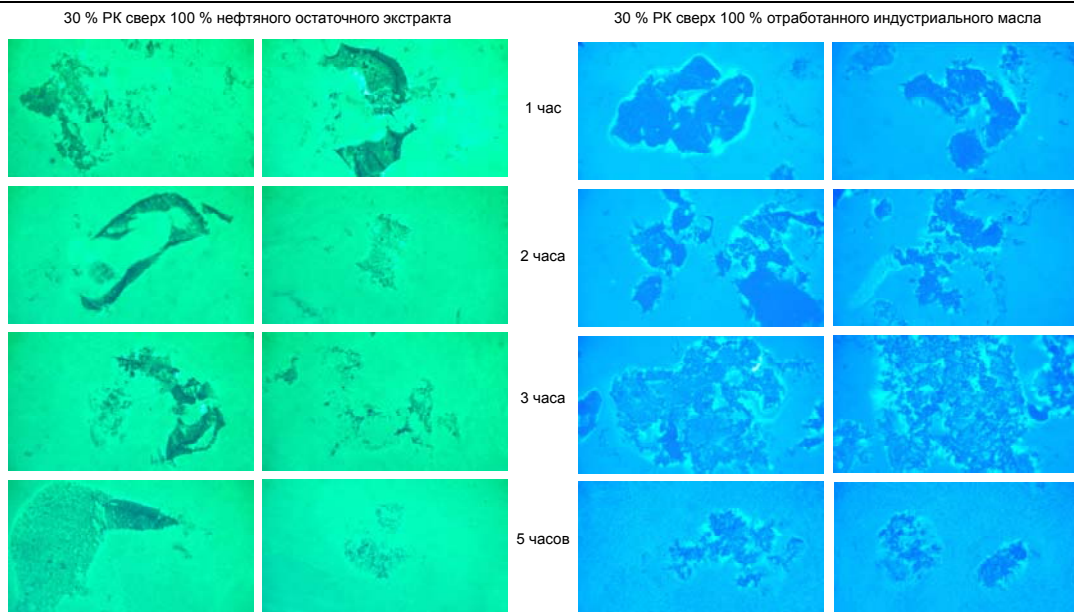


Рис. 4. Флуоресцентная микроскопия для дисперсных систем, составы №2–№3 (200 нм)

Для обеспечения стабилизации и ингибирования происходящего процесса девулканизации на стадии резино-битумного вяжущего на завершающем этапе приготовления предусмотрено введение девулканизатора-стабилизатора. Для установления особенностей влияния резиновой крошки на структуру резино-битумного вяжущего были приготовлены составы (табл. 2) и изучены их эксплуатационные свойства (рис. 5 и табл. 3).

Т а б л и ц а 2

Составы резино-битумных вяжущих

Номер состава	Наименование компонента резино-битумного вяжущего, %					Гомогенность РБВ
	Битум	Отработанное масло индустриальное	Резиновая крошка РК ЧРЗ 0,5	Транс-полиоктеномерный каучук (сверх 100 %)	Синтетический воск (сверх 100 %)	
1	56,6	33,4	10	3	-	однородно
2	34,8	50,2	15	3	-	однородно
3	13,2	66,8	20	3	-	однородно
4	56,6	33,4	10	-	3	однородно
5	34,8	50,2	15	-	3	неоднородно
6	13,2	66,8	20	-	3	неоднородно

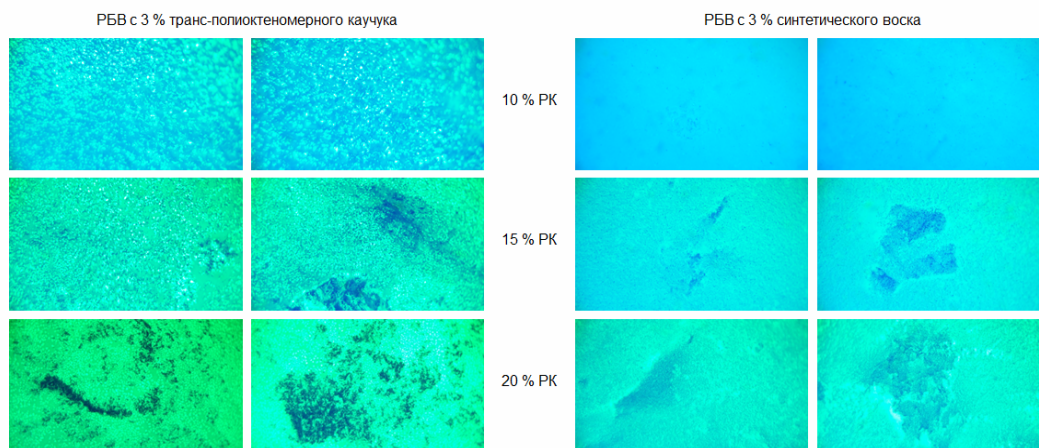


Рис. 5. Флуоресцентная микроскопия для составов РБВ (200 нм)

Анализ данных флуоресцентной микроскопии (рис. 5) позволяет установить, что наиболее равномерное распределение резиновой крошки и отсутствие агрегированных частиц наблюдается в образцах РБВ с 10 % содержанием резиновой крошки и 3 % девулканизирующего/стабилизирующего агента (независимо от его разновидности). Также стоит отметить, что в образцах РБВ с содержанием резиновой крошки 15 % и 20 % наблюдалось видимое расслоение системы, которое подтверждается данными по изучению структурной однородности, поэтому эти образцы далее в исследованиях не рассматривались.

Т а б л и ц а 3

Эксплуатационные свойства резино-битумных вяжущих

№	Наименование показателя	№1	№4	Методы испытаний
Исходные резино-битумные вяжущие				
1	Динамическая вязкость: $\max 3 \text{ Pa}\cdot\text{c}$, температура испытаний 135°C , $\text{Pa}\cdot\text{c}$	0,22	0,08	По ГОСТ 33137
2	Сдвиговая устойчивость: $G^*/\sin\delta$, не менее 1.00 кПа при 10 rad/s , при температуре испытаний $^\circ\text{C}$	58	34	По ГОСТ Р 58400.10
Резино-битумные вяжущие после RTFOT старения				
3	Сдвиговая устойчивость: $G^*/\sin\delta$, не менее 2.20 кПа при 10 рад/с , при температуре испытаний $^\circ\text{C}$	46	34	По ГОСТ 33140 По ГОСТ Р 58400.10

Согласно результатам испытаний полученных РБВ составы № 1 и № 4 удовлетворяют требованиям к вязкости для битумных вяжущих марок *PG*, их вязкость составляет менее $3 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Верхнее температурное значение марки вяжущего состава № 1, приготовленного с использованием трансполиоктеномерного каучука, выше, чем у состава № 4, однако стоит отметить, что для состава № 4, приготовленного с использованием синтетического воска в количестве 3 %, сдвиговая устойчивость для несостаренного и состаренного по методу *RTFOT* состава соответствует одному и тому же верхнему температурному значению марки *PG*. Это свидетельствует о получении устойчивой структуры и стабилизации процесса девулканизации, что предопределяет перспективность дальнейшего изучения влияния данного синтетического воска на свойства РБВ.

Стоит отметить, что в настоящий момент продолжают исследования, направленные на корректировку и оптимизацию составов, подбор более твердой битумной базы, разработку технологических основ для получения более концентрированных резиносодержащих дисперсных систем, с целью увеличения температурного интервала работоспособности получаемых РБВ.

Выводы

Приведены методики приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» (резиносодержащего модифицированного компонента) и резино-битумного вяжущего. На основе данных по сдвиговой вязкости установлена оптимальная продолжительность приготовления резиносодержащего компонента, которая составляет 3 часа. Показано, что в отработанном масле достигается формирование «рыхлой» структуры резиновой крошки, указывающей на ее девулканизацию. Результаты испытаний полученных резино-модифицированных битумных вяжущих показали, что их вязкость соответствует требованиям *PG* классификации. Установлено, что в качестве девулканизирующего/стабилизирующего агента большой потенциал имеет синтетический воск, использование которого в количестве 3 % позволяет сформировать устойчивую структуру резино-битумного вяжущего.

Список литературы

1. Qurashi, I.A. Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil / I.A. Qurashi, A.K. Swamy // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol.182. – P. 992–1000.
2. Cai, J. Investigation on high-viscosity asphalt binder for permeable asphalt concrete with waste materials / J. Cai, C. Song, B. Zhou, Y. Tian, R. Li, J. Zhang, J. Pei // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P.40–51.
3. Ren, S. The continuous swelling-degradation behaviors and chemo-rheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size / S. Ren, X. Liu, P. Lin, H. Wang, W. Fan, S. Erkens // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 307. – P.124966.
4. Wang, H. Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives / H. Wang, X. Liu, S. Erkens, A. Skarpas // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 249. – 118840.
5. Обухова, С.Ю. Особенности структурообразования модифицированного вяжущего в присутствии резиновой крошки. Часть 1: Совместимость резиновой крошки с углеводородными пластификаторами / С.Ю. Обухова, Е.В. Королёв, А.О. Будкина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – №1(58). – С.24–32.
6. Ding, Z. Analysis of viscosity test conditions for crumb-rubber-modified asphalt / Z. Ding, P. Li, J. Zhang, H. Bing, X. Yue // *Construction and Building Materials*. – 2020. – 245. – 118454.
7. Zoorob, S.E. Assessing low shear viscosity as the new bitumen Softening Point test / S.E. Zoorob, J.P. Castro-Gomes, L.A.P. Oliveira // *Construction and Building Materials*. – 2012. – 27. – P. 357–367.

References

1. Qurashi, I.A. Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil / I.A. Qurashi, A.K. Swamy // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol.182. – P. 992–1000.
2. Cai, J. Investigation on high-viscosity asphalt binder for permeable asphalt concrete with waste materials / J. Cai, C. Song, B. Zhou, Y. Tian, R. Li, J. Zhang, J. Pei // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P.40–51.
3. Ren, S. The continuous swelling-degradation behaviors and chemo-rheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size / S. Ren, X. Liu, P. Lin, H. Wang, W. Fan, S. Erkens // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 307. – P.124966.
4. Wang, H. Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives / H. Wang, X. Liu, S. Erkens, A. Skarpas // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 249. – 118840.
5. Obukhova, S.Yu. Peculiarities of structure formation of a modified binder in the presence of crumb rubber. Part 1: Compatibility of crumb rubber with hydrocarbon plasticizers / S.Yu. Obukhova, E.V. Korolev, A.O. Budkina // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – No. 1(58). – P.24–32.
6. Ding, Z. Analysis of viscosity test conditions for crumb-rubber-modified asphalt / Z. Ding, P. Li, J. Zhang, H. Bing, X. Yue // *Construction and Building Materials*. – 2020. – 245. – 118454.
7. Zoorob, S.E. Assessing low shear viscosity as the new bitumen Softening Point test / S.E. Zoorob, J.P. Castro-Gomes, L.A.P. Oliveira // *Construction and Building Materials*. – 2012. – 27. – P. 357–367.

УДК 666.94

DOI 10.54734/20722958_2024_2_13

Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, тел. +7 (495) 781-80-07; факс +7 (495) 781-80-07

Ерофеев Владимир Трофимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение»
E-mail: erofeevt@bk.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

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

Макридин Николай Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского сектора

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoye shosse, tel.: +7(495) 583-73-81; fax: +7(495) 582-59-67

Erofeev Vladimir Trofimovich, Doctor of Sciences, Professor of the Department «Construction Materials Science»
E-mail: erofeevt@bk.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

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

Makridin Nikolai Ivanovich, Doctor of Sciences, Chief Researcher of the research sector

*Светлой памяти Владимира Ивановича
Калашикова посвящается*

ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ И СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ И ТЕКСТИЛЬБЕТОНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРОЧНОСТИ

В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, Н.И. Макридин

Рассмотрена возможность создания современных высокопрочных бетонов нового поколения с использованием современных армирующих материалов. Проанализированы этапы развития технологии высокопрочных сталефибробетонов в России и за рубежом. Показаны преимущества армированных высокопрочных бетонов перед традиционными. Показана возможность получения бетонов прочностью 200 МПа и более на основе суперпластификаторов тонкодисперсных реакционно- и гидравлически активных микронаполнителей и отходов камнедробления. Проанализирована экономическая эффективность использования высокопрочных бетонов в строительстве. Показаны перспективы применения текстильбетонов в строительстве и необходимость внедрения новых технологий.

Ключевые слова: высокопрочные бетоны, самоуплотняющиеся бетоны, стальная фибра, порошково-активированные бетоны, реологически активные микронаполнители, текстильное армирование, тканевые каркасы, суперпластификаторы, тонкостенные конструкции, предельное напряжение сдвига, вязкость, ударная прочность, прочность при растяжении, гидротермальная обработка

POWDER-ACTIVATED HIGH-STRENGTH AND ULTRA-HIGH-STRENGTH FIBER AND TEXTILE CONCRETES OF A NEW GENERATION WITH IMPROVED STRENGTH INDICATORS

V.T. Yerofeyev, O.V. Tarakanov, N.I. Makridin

The possibility of creating modern high-strength concretes of a new generation using modern reinforcing materials is considered. The stages of development high-strength steel fiber reinforced concrete technology in Russia and abroad are analyzed. The advantages of reinforced high-strength concretes over traditional ones are shown. The possibility of obtaining concretes with a strength of 200 MPa or more based on superplasticizers of finely dispersed reactive and hydraulically active microfillers and stone crushing waste is shown. The economic efficiency of using high-strength concrete in construction is analyzed. The prospect of using textile concretes in construction and the need to introduce new technologies are shown.

Keywords: high-strength concrete, self-compacting concrete, steel fiber, powder activated concrete, rheologically active microfillers, textile reinforcement, fabric frames, superplasticizers, thin-walled structures, ultimate shear stress, viscosity, impact strength, tensile strength, hydrothermal treatment

Введение арматуры в состав композиционных материалов существенным образом расширяет области их применения до несущих функций с повышенными показателями прочности при статических и динамических нагрузках. Первыми достаточно эффективными армированными композиционными строительными материалами (КСМ), созданными на основе научного подхода, следует считать железобетон, фибробетон и стеклопластики, в которых наиболее удачно использованы положительные свойства составляющих компонентов [1].

Первые сведения о сталефибробетоне появились еще в начале XX века. Долгое время в практике строительства сталефибробетон не применялся из-за не только дефицитности и высокой стоимости материала армирования, но и низкой прочности матриц, не обеспечивающих достаточное сцепление с фиброй. Интерес к сталефибробетону усилился в 1960-х гг., что связано с интенсивным развитием композиционных материалов в смежных отраслях промышленности. Внедрению нового композиционного материала в экспериментальное строительство способствовало освоение промышленностью выпуска широкого ассортимента стальной фибры. На мировом рынке в настоящее время представлено несколько десятков разновидностей фибры США, Великобритании, ФРГ, Японии, Швеции [2].

Один из этапов развития фибробетонов относится к периоду 1975–1985 гг. с появлением суперпластификаторов и повышением прочности бетонов на сжатие до 60–70 МПа. Однако за рубежом и в СССР использовались толстые стальные волокна диаметром 0,8–1,0 мм и длиной 50–100 мм. В СССР в этот период осваивались фибробетоны, характеризующиеся огромным расходом фибры, достигавшим 800–1200 кг/м³, т. е. со степенью армирования 10–15 %. При этом фибра в рыхлонасыпном состоянии укладывалась в формы и проливалась цементным тестом. Стоимость 1 м³ фибробетонной смеси превышала стоимость обычного бетона в 4–5 раз. Естественно, что такой бетон не оправдывал себя экономически. Кроме того, в фибробетонах использовались бетоны, свойства которых не удовлетворяли конструкционным требованиям. Основным недостатком традиционных фибробетонов в этом случае является использование для них бетонов старого поколения с рецептурой сухих компонентов «цемент-песок-щебень» или «цемент-песок» с прочностью бетонной матрицы на сжатие 40–50 МПа и с прочностью на растяжение при изгибе 7–8 МПа. Стальная и неметаллическая минеральная короткая фибра в таких фибробетонах выдергивается из бетонной матрицы [3]. В результате не используются высокие прочностные свойства стальной фибры, минеральных и углеродных волокон. Поэтому традиционные фибробетоны не удо-

влетворяют требованиям высокой прочности на осевое растяжение, на растяжение при изгибе, высокой ударной прочности и ductility.

Высокопрочная фибра «дождалась» высокопрочной матрицы после разработки порошково-активированных бетонов нового поколения с прочностью на сжатие 120–160 МПа [4, 5]. За рубежом это высокофункциональные бетоны (High Performance Concrete), высокопрочные и сверхвысокопрочные бетоны (High Strength Concrete, Ultra High Strength Concrete), самоуплотняющиеся бетоны (Self Compacting Concrete), которые изготавливаются с обязательным использованием ограниченного по объемам отхода производства ферросилиция – микрокремнезема (МК) [6, 7]. Объемы выхода реакционно-активного МК в России составляют 150 тыс. т в год, что может обеспечить выпуск 3–4 % бетона от общего количества производимых бетонов [5, 8]. В этой связи является актуальным снижение расхода МК в бетонах и других цементных композитах. В последние годы в мировой практике рассматриваются вопросы использования вместо микрокремнезема микронаполнителей другой природы – стеклянного порошка, золы рисовой шелухи, золы-уноса [9].

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства (ПГУАС) разработаны мелкозернистые высокопрочные и сверхпрочные самоуплотняющиеся порошково-активированные фибробетоны с прочностью на сжатие 200–220 МПа, с прочностью на растяжение при изгибе 20–25 МПа. В отличие от последних аналогов ультравысокопрочных бетонов передовых индустриально развитых стран, в разработанных фибробетонах сокращаются расходы (или вообще не используются) дорогого дефицитного нанометрического микрокремнезема (размер 20–1000 нм) и других синтезированных реакционно-активных нанокремнеземов (fumed silica, precipitated silica, silica colloidal и т. п.). В первом случае порошковая составляющая включает одновременно реакционный и реологический наполнители, а во втором – только порошкообразный наполнитель из горной породы, МК отсутствует [5].

Применение специальной технологии позволяет получать бетоны с прочностью более 100 МПа. Разработка таких бетонов основана на использовании фундаментальных положений физикохимии дисперсных систем, а точнее – на свойствах агрегативно-устойчивых, предельно-концентрированных цементно-водно-минеральных суспензий в пластифицированных бетонных смесях. Бетонные смеси нового поколения должны быть суспензионно-наполненными, состоящими из цемента, порошкообразной горной породы и тонкозернистого песка. Объемное содержание суспензионной составляющей, согласно нашим исследованиям, в щебеночных бетонных смесях достигает 50–60 %, в песчаных бетонных смесях – 70–80 % [4]. Это значительно выше объемного содержания цементно-водной суспензии в щебеночных смесях старого поколения (25–30 %) и в песчаных смесях старого поколения (40–50 %). Высокое содержание суспензионной составляющей кардинально изменяет топологию и реологическое состояние смесей с гравитационным самопроизвольным растеканием их [4]. Это способствует созданию самоуплотняющихся бетонов и фибробетонов при низком содержании воды, с низкой капиллярной пористостью, с высокой химической и биологической стойкостью при применении стальной, базальтовой и углеродной фибры, а также текстильбетонов с использованием текстильных сеток из высокопрочных минеральных и углеродистых нитей [10–16].

Для производства высокопрочных и сверхвысокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов нового поколения с прочностью 140–160 МПа используют отходы камнедробления плотных горных пород вулканического, осадочного и метаморфического происхождения фракции 0–5 мм (гранит, диорит, базальт, диабаз, габбро, известняк, доломит, мрамор, гнейс, кварцевый песчаник и т. д.). На карьерах, производящих щебень для автомобильных и железных дорог, скопилось более 1 млрд т неиспользуемых отсеков, в которых овеществлен человеческий труд, осуществлены затраты электроэнергии и органического топлива. Поэтому производство бетонов нового поколения предопределяет не только достижение высоких технических показателей, но и внедрение эффективных энергосберегающих технологий, а также рациональное материаловосбережение и природопользование, то есть охрану окружаю-

шей среды. Высокопрочные и сверхвысокопрочные бетоны формируют глобальную экономику в любой индустриально развитой стране, производящей бетон и железобетон для строительства.

В целом экономика строительства монолитных зданий и сооружений из особо высокопрочного бетона, при уменьшении его объема в конструкциях в 3–4 раза, складывается из следующих экономических и экологических показателей:

- снижаются энергетические затраты на разгрузку щебня, песка и цемента, внутризаводскую транспортировку их и бетонной смеси, ее виброуплотнение, расход пара на тепловую обработку, замену и ремонт быстроизнашивающегося оборудования и иного внутризаводского транспорта и бетоносмесительных цехов на заводах-изготовителях;
- полностью исключается износ формующего оборудования, в том числе виброуплотняющего;
- уменьшаются расходы на заработную плату формовщиков, распалубочников, строповщиков, крановщиков на заводе-изготовителе сборного железобетона;
- снижается трудоемкость при укладке самоуплотняющихся бетонных смесей без использования вибрационного оборудования;
- сокращается расход тепловой энергии в зимний период при монолитном строительстве в связи с быстрым набором прочности бетона, достигающий на 1 сутки 40–60 МПа;
- уменьшается износ горнодобывающего и технологического оборудования по переработке и обогащению щебня для заводов ЖБИ, сокращается расход электроэнергии на предприятиях нерудной промышленности;
- при транспортировке бетонной смеси с завода-изготовителя на объект объем бетонной смеси, перевозимой в миксерах, уменьшается в 2–4 раза, за счёт этого снижается износ спецавтотранспорта в 4–6 раз (грузовые и порожние рейсы), сокращаются расход горючего в 4,5–5 раз, а также расходы на заработную плату водителей в 6 раз (вместо 4 водителей только 1);
- при транспортировке щебня железнодорожным транспортом объёмы щебня сокращаются в 3 раза, уменьшается количество горючего или электроэнергии в 5 раз, включая возврат пустых полувагонов на предприятия нерудной промышленности, снижается износ железнодорожного транспорта в 6 раз при транспортировке щебня вследствие исключения транспортировки щебня при выпуске РПБ и в 3 раза при производстве высокопрочного щебеночного бетона. Значительно уменьшаются расходы на заработную плату машинистов, сокращаются затраты на ремонт железнодорожных путей за счет уменьшения железнодорожных перевозок;
- исключаются ремонтные работы зданий и сооружений, связанные с использованием некачественного бетона для изделий и конструкций, подверженных разрушающему воздействию механических нагрузок, попеременного увлажнения и высушивания, замораживания и оттаивания, а также агрессивных сред, при замене такого бетона высокопрочным, высоководостойким, морозостойким, коррозионно-стойким, водонепроницаемым, ударопрочным;
- уменьшаются затраты на ремонт асфальтированных и грунтовых дорог за счет снижения автотранспортных перевозок щебня, вместе с этими показателями существенно сокращаются расходы на заработную плату рабочих;
- немаловажный экономический эффект складывается при монтаже зданий и сооружений из ВПБ; он связан с уменьшением грузоподъемности монтажных кранов, снижением износа бетононасосов и сокращением расхода энергии на перекачку бетона, особенно при многоэтажном строительстве, более чем в 3 раза;
- ускорение темпов монтажных работ и строительства зданий и сооружений, в связи с быстрым набором прочности бетона в течение одних суток, сокращение расходов на оплату труда строительных рабочих при возведении зданий и сооружений;

- уменьшение массы зданий и сооружений, которое влечет за собой существенное снижение массы фундаментов под строительные объекты;
- улучшение экологии окружающей среды при уменьшении автотранспортных перевозок бетона на объект строительства за счет снижения выброса газов от автомобильного и железнодорожного транспорта.

Из суммирования экономических преимуществ в перечисленных отраслях промышленности складывается глобальная экономика строительства из высокопрочного железобетона.

Возможности использования высокопрочных и сверхпрочных бетонов нового поколения распространяются за рубежом не только на сферу строительства, но и на область машиностроения для изготовления станин токарных, сверлильных, фрезерных, металлообрабатывающих станков и не только потому, что они существенно дешевле стальных и чугунных, а вследствие значительного повышения точности обработки металлоизделий.

В Швейцарии и в Австрии разработаны бурильные коронки из сверхпрочного фибробетона, наполненного 80–100 кг корунда на 1 м бетона, взамен коронок из сверхтвердой стали. Проведенные испытания при бурении скважин в горных грунтах для строительства зданий и сооружений показали увеличение ресурса по сравнению с остальными.

В Красноярске в ООО «НТС» по разработкам ПГУАС были изготовлены в натуральную величину башмаки из сверхпрочного фибробетона с прочностью 180 МПа взамен стальных. Башмаки предназначены для забивки их стальными трубами в грунт с последующим бетонированием с одновременным извлечением труб из скважин. Железобетонные буронабивные сваи планировались под стальные колонны при строительстве завода по производству алюминия. В связи с удешевлением стоимости алюминия в Европе предприниматель В.О. Потанин отложил реализацию этого проекта. Однако проведенные экономические расчеты показали, что при замене 10 тыс. стальных башмаков фибробетонными достигается экономия 121 млн руб.

Порошково-активированные бетоны нового поколения с дисперсными и тонкозернистыми наполнителями, с песком-заполнителем и щебнем из тяжёлых горных пород или из тяжёлых техногенных побочных продуктов обладают более высокими защитными свойствами от жестких радиационных гамма-излучений по сравнению с бетонами старого поколения с традиционной рецептурой. Проведённые испытания бетонов с плотностью 4100–4200 кг/м³ в Российском федеральном ядерном центре на установке «γ ток-100» показали значительное увеличение линейного коэффициента ослабления γ-излучений.

Дисперсно-армированные порошковые бетоны очень эффективны для производства не только несущих конструкций с комбинированным армированием предварительно напряженной арматурой, но и очень тонкостенных, в том числе пространственных, архитектурных деталей. По последним данным, возможно текстильное армирование конструкций. Бетонные смеси из таких тонкозернистых смесей растекаются под действием собственного веса, заполняя полностью густую сетчатую структуру тканого каркаса и все сопряжения филигранной формы.

«Высокая» реология порошковых бетонных смесей (ПБС) обеспечивается при содержании воды 10–12 % от массы сухих компонентов (предел текучести $\tau_0=5\text{--}15$ Па, что всего лишь в 5–10 раз выше, чем в масляных красках). Низкий предел текучести достигается за счет оптимальной толщины прослойки реологической матрицы между частями песка. Из рассмотрения топологической структуры ПБС, приняв расположение частиц песка в углах кубической ячейки, среднюю толщину прослойки определяют по формуле [14]

$$X = 0,806 \cdot d_{\text{п}} \cdot \sqrt[3]{1/C_{\text{пв}}} - d_{\text{п}},$$

где $d_{\text{п}}$ – средний диаметр частиц песка; $C_{\text{пв}}$ – объемная концентрация его в РПБ.

Для состава при $B/T = 0,103$ толщина прослойки будет 0,056 мм. De Lagard и Sedran установили, что для более мелких песков ($d = 0,125-0,4$ мм) толщина варьирует от 48 до 88 мкм. Увеличение прослойки частиц снижает вязкость и предельное напряжение сдвига и увеличивает текучесть. Текучесть может возрасти за счет добавления воды и введения СП. В общем виде влияние воды и СП на изменение вязкости, предельного напряжения сдвига и текучести неоднозначно.

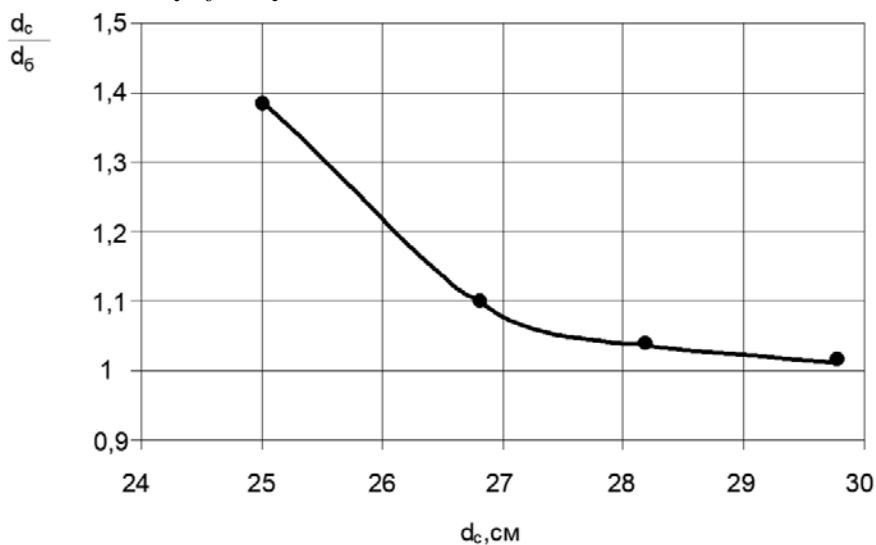
Суперпластификатор, по представлениям Cruber P., Lemer C., Puhl M., понижает вязкость в значительно меньшей степени, чем добавление воды. Наши практические результаты показывают, что понижение предела текучести за счет СП значительно более высокое, чем под влиянием воды.

Для саморастекающихся бетонных смесей наиболее важно снижение предела текучести до минимума, нежели снижение вязкости. Понижение вязкости для самоуплотняющихся порошковых бетонов должно обеспечить удаление сферических пузырьков воздуха диаметром 0,3 мм и более. Основные свойства суперпластифицированных предельно наполненных систем состоят в том, что вязкость может быть достаточно высокой и система может медленно течь, если предел текучести мал. Для обычных систем без СП вязкость может быть малой, но повышенный предел текучести препятствует выделению пузырьков газа при растекании суспензий, так как у них отсутствует послетиксотропный ресурс течения.

Растекаемость порошковых бетонных смесей чрезвычайно важна при формировании бетонных изделий с уложенными в форму тканями объемно-сеточными каркасами. Такие объемные ажурно-тканевые каркасы в форме тавра, двутавра, швеллера и других конфигураций позволяют осуществлять быстрое армирование, заключающееся в установке и фиксации каркаса в форме с последующей заливкой суспензионного бетона, легко проникающего через ячейки каркаса размером 2–5 мм. Тканевые каркасы позволяют радикально повысить трещиностойкость бетона при воздействии знакопеременных колебаний температуры и значительно снизить деформации.

Бетонная смесь должна не только легко проливаться локально через сеточный каркас, но и растекаться при заполнении формы «обратным» проникновением через каркас при увеличении объема смеси в форме. Для оценки текучести использовали порошковые смеси одинакового состава по содержанию сухих компонентов, а растекаемость из конуса (для встряхивающего столика) регулировали количеством СП и, частично, воды. Для блокирования растекания предложено сеточное кольцо диаметром 175 мм.

Сетка имела размер в свету $2,8 \times 2,8$ мм при диаметре проволоки $0,3 \times 0,3$ мм. Контрольные смеси изготавливались с распылами 25,0; 26,5; 28,2 и 29,8 см. В результате опытов было установлено, что с повышением текучести смеси отношение диаметров свободного d_c и заблокированного d_6 распыла снижается. На рисунке показано изменение d_c/d_6 от значения свободного распыла d_c .



Изменение d_c/d_6 от значения свободного распыла d_c

Как следует из рисунка, разница в расплывах смеси d_c и d_b исчезает при текучести, характеризуемой свободным расплывом 29,8 см. При $d_c = 28,2$ расплыв через сетку уменьшается на 5 %. Особенно большое торможение растеканию через сетку испытывает смесь с расплывом 25 см.

В связи с этим при применении сеточных каркасов с ячейкой 3×3 мм необходимо использовать смеси с расплывом не менее 28–30 см.

Как свидетельствуют зарубежные данные, при 3 %-м армировании прочность при сжатии достигает 180–200 МПа, при осевом растяжении – 8–10 МПа. Ударная прочность возрастает более чем десятикратно.

Таким образом, делаем вывод, что возможности порошковых бетонов далеко не исчерпаны, учитывая эффективность гидротермальной обработки и влияние ее на увеличение доли тоберморита и, особенно, ксонотлита.

Указанные выше разработки в технологии бетонов нового поколения находятся на переднем рубеже научного прогресса в области производства бетонов и соответствуют самым последним зарубежным аналогам индустриально развитых стран. По мелкозернистым бетонам и фибробетонам с высокими значениями физико-технических, гигрометрических свойств Россия опередила эти страны.

Широкое внедрение новых бетонов в практику пока не реализовано, потому что предпринимателям проще работать по старым технологиям. Государственные интересы экономического развития страны в сфере технологии бетонов часто не совпадают с интересами большинства предпринимателей, для которых лучше производить большие объёмы бетонов с традиционной прочностью. Необходима государственная стратегия развития бетонов нового поколения. Для многих отраслей Правительством России создана программа импортозамещения изделий, материалов и технологий, но пока что цеховое оборудование и технология закупается за рубежом. Использование бетонов нового поколения может осуществить кардинальный прорыв при строительстве зданий и сооружений, в том числе объектов Министерства обороны Российской Федерации.

Список литературы

1. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / Ф.Н. Рабинович. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 559 с.
2. Xun, X. Influence of curing regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers / X. Xun, Z. Ronghua, L. Yinghu // Construct. Build. Mater. – 2020. – 232. – 117129. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117129>.
3. Исследование свойств дисперсно-армированных бетонов с элементами методики изучения сцепления фибры с бетоном / Д.А. Абрамов, Д.М. Валиев, В.Л. Хвастунов [и др.]. – 2010. – URL: ehlementami_metodiki_izuchenija_sceplenija_fibry_s_betonom/11-0-10.betons.ucoz.ru/publ/issledovanie_svojstv_dispersno_armirovannykh_betonov_s_.
4. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во. – 2016. – № 4 (688). – С. 30–37.
5. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В.И. Калашников // Строит. материалы. – 2012. – № 10. – С. 70–71.
6. Alharbi, Y.R. Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, A.A. Salah, O.A. Mayhoub, M. Kohail // Construct. Build. Mater. – Feb. 2021. – 271. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121550>.
7. Richard, P. Composition of reactive powder concretes / P. Richard, M. Cheyrezy // Cement Concr. Res. – 1995. – 25 (7) – P. 1501–1511. – URL: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).

8. Ушеров-Маршак, А.В. Высокофункциональный бетон – модный термин или философия бетона нового поколения / А.В. Ушеров-Маршак // Строит. материалы. – 2010. – № 11. – С. 34–35.
9. Jiao, Y. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass sand as partial replacement material / Y. Jiao, Y. Zhang, M. Guo, L. Zhang, H. Ning, S. Liu // J. Clean. Prod. – 2020. – 277. – 123501. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123501>.
10. Гуляева, Е.В. Реотехнологические характеристики пластифицированных цементно-минеральных дисперсных суспензий и бетонных смесей для производства эффективных бетонов: дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Гуляева. – Пенза, 2012. – 178 с.
11. Ананьев, С.В. Состав, топологическая структура и реотехнологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Ананьев. – Пенза, 2011. – 148 с.
12. Володин, В.М. Порошково-активированный высокопрочный песчаный бетон и фибробетон с низким удельным расходом цемента на единицу прочности: дис. ... канд. техн. наук / В.М. Володин. – Пенза, 2012. – 160 с.
13. Ерофеева, И.В. Физико-механические свойства, биологическая и климатическая стойкость порошково-активированных бетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.В. Ерофеева. – Пенза, 2018. – 28 с.
14. Калашников, С.В. Тонкозернистые реакционно-порошковые дисперсно-армированные бетоны с использованием горных пород: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Калашников. – Пенза, 2006. – 181 с.
15. Суздальцев, О.В. Долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород: дис. ... канд. техн. наук / О. В. Суздальцев. – Пенза, 2015. – 237 с.
16. Мороз, М.Н. Высокогидрофобные минерально-шлаковые композиционные материалы: дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Мороз. – Пенза, 2007. – 234 с.

References

1. Rabinovich, F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete: questions of theory and design, technology, structures: monograph / F.N. Rabinovich. – 3rd ed., revised. and additional – M.: Publishing house ASV, 2004. – 559 p.
2. Xun, X. Influence of curing regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers / X. Xun, Z. Ronghua, L. Yinghu // Construct. Build. Mater. – 2020. – 232. – 117129. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117129>.
3. Study of the properties of dispersed reinforced concrete with elements of a technique for studying the adhesion of fiber to concrete / D.A. Abramov, D.M. Valiev, V.L. Khvastunov [etc.]. – 2010. – URL: [ehlementami_metodiki_izuchenija_sceplenija_fibry_s_betonom/11-0-10.betons.ucoz.ru/publ/issledovanie_svojstv_dispersno_armirovannykh_betonov_s_](http://elementami_metodiki_izuchenija_sceplenija_fibry_s_betonom/11-0-10.betons.ucoz.ru/publ/issledovanie_svojstv_dispersno_armirovannykh_betonov_s_).
4. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // Izv. higher textbook establishments. Str. – 2016. – No. 4 (688). – P. 30–37.
5. Kalashnikov, V.I. What is powder-activated concrete of the new generation / V.I. Kalashnikov // Stroit. materials. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.
6. Alharbi, Y.R. Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, A.A. Salah, O.A. Mayhoub, M. Kohail // Construct. Build. Mater. – Feb. 2021. – 271. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121550>.
7. Richard, P. Composition of reactive powder concretes / P. Richard, M. Cheyrezy // Cement Concr. Res. – 1995. – 25 (7) – P. 1501–1511. – URL: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).

8. Usharov-Marshak, A.V. Highly functional concrete – a fashionable term or philosophy of new generation concrete / A.V. Usharov-Marshak // *Stroit. materials.* – 2010. – No. 11. – P. 34–35.
9. Jiao, Y. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass sand as partial replacement material / Y. Jiao, Y. Zhang, M. Guo, L. Zhang, H. Ning, S. Liu // *J. Clean. Prod.* – 2020. – 277. – 123501. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123501>.
10. Gulyaeva, E.V. Rheotechnological characteristics of plasticized cement-mineral dispersed suspensions and concrete mixtures for the production of effective concrete: dis. ...cand. of Sciences / E.V. Gulyaeva. – Penza, 2012. – 178 p
11. Ananyev, S.V. Composition, topological structure and rheotechnological properties of rheological matrices for the production of new generation concrete: dis. ... cand. of Sciences / S.V. Ananyev. – Penza, 2011. – 148 p.
12. Volodin, V.M. Powder-activated high-strength sand concrete and fiber-reinforced concrete with low specific cement consumption per unit of strength: dis. ...cand. of Sciences / V.M. Volodin. – Penza, 2012. – 160 p.
13. Erofeeva, I.V. Physico-mechanical properties, biological and climatic resistance of powder-activated concrete: abstract dis. ...cand. of Sciences / I.V. Erofeeva. – Penza, 2018. – 28 p.
14. Kalashnikov, S.V. Fine-grained reaction-powder dispersed reinforced concrete using rocks: dissertation thesis. ... cand. of Sciences / S. V. Kalashnikov. – Penza, 2006. – 181 p.
15. Suzdaltsev, O.V. Long-lasting architectural and decorative powder-activated concrete using waste from rock crushing: dis. ... cand. of Sciences / O. V. Suzdaltsev. – Penza, 2015. – 237 p.
16. Moroz, M.N. Highly hydrophobic mineral-slag composite materials: dis. ... cand. of Sciences / M.N. Moroz. – Penza, 2007. – 234 p.

УДК 69:519.7

DOI 10.54734/20722958_2024_2_22

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

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
E-mail: fmatem@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

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

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, editor-in-chief of the
editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

На основе ретроспективного анализа проектирования композитов определены когнитивный, гомеостатический и синергетический подходы к их синтезу как сложных слабоструктурированных и слабоформализуемых систем с возможностью переноса знаний из одной области в другую. Особое внимание уделяется развитию принципов и методов системного подхода к объектам и использованию универсальных системных закономерностей, которым подчиняется формирование структуры и свойств сложных систем. Системный подход позволил раскрыть механизмы управления при поиске новых концепций. Предполагается, что композиты устроены не только по принципам детерминизма, и их неотъемлемыми свойствами являются неопределенность и случайность; разрушение структуры – это и потенциальный источник развития более сложной и высокоорганизованной системы. Без комплексного и системного решения взаимосвязанных вопросов невозможно достичь новых существенных результатов при синтезе материалов как сложных систем.

Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, анализ, синтез, моделирование, ретроспективные методы

EXPERIENCE IN COMPOSITES DESIGN: RETROSPECTIVE ANALYSIS

I.A. Garkina, A.M. Danilov

Based on a retrospective analysis of composites designing, cognitive, homeostatic and synergetic approaches to their synthesis as complex weakly structured and weakly formalized systems with the possibility of transferring knowledge from one area to another have been identified. Particular attention is paid to the development of principles and methods of a systematic approach to objects and the use of universal system laws that govern the formation of the structure and properties of complex systems. The systematic approach has made it possible to reveal control mechanisms when searching new concepts. It is assumed that composites are structured not only according to the principles of determinism, but their inherent properties are uncertainty and randomness; the destruction of the structure is also a potential source for the development of a more complex and highly organized system. Without a comprehensive and systematic solution of interrelated issues, it is impossible to achieve new significant results in the synthesis of materials as complex systems.

Keywords: composite materials, complex systems, analysis, synthesis, modeling, retrospective methods

Известно, сложная система определяется как составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными соотношениями. Свойства сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Исходя из этого, ниже на основе собственного опыта и опыта других авторов по разработке композиционных материалов приводятся результаты ретроспективного анализа современного состояния и перспектив совершенствования методов проектирования композитов как сложных систем [1, 2].

1. Композиты как сложные системы

Одним из способов исследования сложных слабоструктурированных систем множеством противоречивых целей и критериев является когнитивное моделирование (введено в 1948 г. Э.Толменом, лат. *cognitio* – знание; структуризация, состоящая в формировании и уточнении гипотезы о функционировании объекта). На предварительном этапе исследований большинство сложных систем могут рассматриваться как слабоструктурированные. Основа когнитивного моделирования – когнитивная карта (ориентированный граф), позволяющая формализовать взаимодействие при функционировании системы основных связей (может использоваться неполная, нечеткая и даже противоречивая информация). Вершины орграфа – факторы (концепты); дуги указывают каузальные (лат. *causa* – причина) связи между факторами (веса определяют степени влияния). Различные модификации моделей (соответствуют различным интерпретациям вершин, дуг и весов) исследуются с использованием различного формального аппарата.

Существенное участие человека при формализации первичных представлений субъектно-формальными методами не позволяет гарантировать достоверность полученных решений (например, риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации вследствие недопонимания математического смысла конструкций специалистами проблемной области).

Целесообразно представление фактора в нормальной форме (переменная в определенной оценочной шкале). Лингвистически нормальность фактора позволяет использовать словесные контексты типа: «больше – меньше», «рост – снижение» (нередко затрудняется даже выбор аналогичных по смыслу контекстов «хуже – лучше») и др. Требуется когнитивная ясность понятия «фактор» как переменной требуемого типа.

Одни и те же каузальные связи при моделировании могут быть в когнитивной карте представлены с использованием различных понятий. Предполагаемая обычно справедливость принципа транзитивности каузальных понятий (из A является причиной B , а B – причиной C следует, что A является причиной C) во многих случаях неверна (возможна ложная транзитивность).

Как видим, когнитивная карта отражает субъективные представления о функционировании и развитии системы (стратегический шаг $S^i \rightarrow S^{i+1}$ состоит в переводе системы из состояния S^i в S^{i+1}). Построение с ее использованием иерархической структуры критериев качества, а также иерархической структуры собственно системы (если это возможно), позволяет рассматривать систему в дальнейшем уже как структурированную.

Целевое состояние системы считается достигнутым, если оценка целенаправленного развития системы, заданная в виде функционала достижения целей, практически не изменяется.

Сложность системы требует ее междисциплинарных исследований и привлечения при построении когнитивной карты специалистов, компетентных в различных узкопредметных областях знаний; формализации первичных представлений о слабоструктурированной проблеме в виде коллективной когнитивной карты (для обобщения и согласования разных представлений). Решение этой задачи в известной мере

возможно с использованием методов концептуальной структуризации, критериев и частных технологий формирования и согласования коллективных понятий.

Приведенный подход успешно использовался при синтезе радиационно-защитного композита как сложной системы, его идентификации, формировании и формализации целей, множества альтернатив для их достижения и, наконец, многокритериальной оптимизации [3].

2. Управление качеством материалов

В последнее время при решении самых разнообразных задач широкое распространение получила хеометрика; хеометрический подход основан на применении проекционных математических методов, позволяющих выделять в больших массивах данных латентные переменные и анализировать связи в изучаемой системе. К сожалению, несмотря на простоту и эффективность такого (часто и визуального) подхода к анализу экспериментальных данных, он практически не используется в строительном материаловедении.

С использованием метода главных компонент PCA (Principal Component Analysis) легко производится ранжирование критериев качества $q_i, i = \overline{1, p}$ по полученным их значениям для n экспериментальных образцов [4, 5].

Первая главная компонента определяется как направление наибольшего изменения (разброса вдоль некоторой центральной оси – новой переменной) данных $\mathbf{q} = \|q_{ij}\|, i = \overline{1, p}, j = \overline{1, n}$ в декартовой системе координат $Oq_1q_2\dots q_p$ (приближенно – чисто геометрически; уточнение – на основе наилучшей линейной аппроксимации всех исходных точек q_{ij} методом наименьших квадратов). Вторая главная компонента принимается (по определению!) ортогональной направлению первой (вдоль нее происходит следующее по величине изменение значений q_{ij}), а третья компонента – перпендикулярной как первой, так и второй (лежит в направлении, в котором происходит третье по величине изменение данных). Аналогично определяются и последующие главные направления. Полученная система главных компонент дает совокупность ортогональных осей, каждая из которых лежит в направлении максимального изменения данных в порядке убывания этих величин. В силу ортогональности главных компонент в полученном новом наборе переменные (линейные комбинации исходных переменных) уже не коррелируют друг с другом. Переход от исходной декартовой системы координат к новому набору ортогональных осей позволяет избавиться от зависимости между критериями. Верхний предел числа главных компонент не превышает $\max\{n-1, p\}$; эффективная размерность пространства главных компонент определяется рангом матрицы $\mathbf{q} = \|q_{ij}\|$. Последняя главная

компонента лежит в направлении, в котором разница между образцами будет минимальной (фактически различие образцов здесь невозможно, так как все эти отличия есть лишь случайный шум). *Главные компоненты с большими номерами рассматриваются как направления, в которых основная составляющая является шумом.* Нами методом PCA осуществлялась декомпозиция исходной матрицы данных на структурную часть (несколько главных первых компонент, лежащих в направлениях максимальных изменений) и на шум (направления, в которых разница между положением точек мала и ею можно пренебречь). Каждую из свойств (критериев качества) рассматривали как интегральную характеристику материала (зависит от свойств компонентов, состава, условий приготовления, твердения и т.д.); использовалась совокупность как зависимых, так и противоречивых критериев (химическая стойкость, морозо-, термостойкость, сопротивление удару и истиранию, радиационный разогрев, адгезионные свойства, защитные свойства по отношению к стальной арматуре и др.). Методом PCA выделялась совокупность линейных комбинаций исходных критериев (практически независимых), что в последующем с использованием методов плани-

рования эксперимента, многокритериальной оптимизации позволило разработать ряд композиционных материалов.

3. Средства и методы цифровой обработки изображений

Любой из рассматриваемых методов состоит из несколько стадий; обязательны дискретизация непрерывного цвето-яркостного поля и преобразование полученного образа. Дискретизация выполняется аппаратными средствами приемного устройства. Полученный двумерный массив хроматических координат – входные данные (результат выполнения большинства операций).

Известны программные среды, позволяющие выполнять матричные вычисления. Многие из них управляются языками высокого уровня (фактически *интерпретаторы* с этих языков). Средства набора позволяют, в частности, выполнять двумерное преобразование Фурье и вычислять свертку. Однако функции для работы с изображениями в различных цветовых пространствах не реализованы.

Средства обработки изображений содержатся и в программных пакетах для работы с растровой графикой. Так, GIMP содержит развитые средства перехода между цветовыми пространствами, статистического анализа, вычисления свертки в пространственной области и допускает работу в пакетном режиме (входной язык – надмножество LISP). Однако большинство пакетов используют однобайтовые целочисленные значения для внутреннего представления данных, что приводит к потере информации.

Для описания задач обработки изображений был предложен специализированный язык обработки изображений – *язык IPL*. При реализации IPL-интерпретатора в числе учтены:

- *поддержка пакетного режима*;
- использование для внутреннего представления значений с плавающей запятой;
- поддержка средств выполнения *свертки в области обратных длин*. Акцент сделан на *открытости*, понимаемой как возможность сопровождения и расширения функциональности, а также *переносимости* между разнородными вычислительными платформами (WinAPI и POSIX).

Фундаментальными типами языка являются вектор, матрица и *двоичная декомпозиция*. В структуре интерпретатора выделены два уровня – прикладной и сервисный (реализованы на ANSI C). Первый инкапсулирует синтаксический разбор и основные алгоритмы обработки. Второй содержит реализацию абстрактных типов данных и объектов, изолирующих системные вызовы целевой платформы.

Функциональность предложенного языка и работа интерпретатора апробированы при решении ряда прикладных задач – оценке (вычислении скалярных критериев) качества защитно-декоративных покрытий, распознавании признаков в пространственной области и области обратных длин, сравнении средств цифровой фильтрации [6...8].

4. Аналитические методы синтеза композитов

На основе опыта разработки и управления качеством материалов специального назначения определим подходы и методологические принципы создания материалов с использованием методов системного анализа [3]. Сначала композит рассматривается как слабоструктурированная многоцелевая система. Далее на основе междисциплинарных исследований (используется и неполная, нечеткая и даже противоречивая информация) формализуется взаимодействие существующих в системе основных связей, определяющих ее функционирование. Затем с использованием когнитивной карты (целесообразней – коллективной) определяются иерархические структуры критериев качества и собственно системы (позволяет рассматривать систему уже как структурированную). При качественной оценке свойств материалов и определении связей между ними широко используются методы ранговой корреляции. Так, они показали отсутствие необходимости определения некоторых свойств композиционных материалов (например, предела прочности при сжатии или твердости) в связи с наличием существенных связей между ними. По статистической значимости

выборочного значения коэффициента конкордации также показано отсутствие согласованности между всей совокупностью показателей при наличии парной согласованности между отдельными из них. Рассматривая предел прочности при сжатии в качестве результирующей переменной, решалась задача регрессии на порядковых переменных.

Формализация процессов формирования физико-механических характеристик материала осуществлялась как решение общей задачи идентификации в классе обыкновенных дифференциальных уравнений (для радиационно-защитных композитов – не выше четвертого порядка); производилась параметрическая идентификация кинетических процессов.

Оптимизация рецептурно-технологических параметров и управление качеством материала решались как задачи многокритериальной оптимизации (предварительная минимизация размерности критериального пространства; принцип, диаграмма и множества Парето; методы планирования эксперимента и нелинейного программирования). При противоречивых критериях многокритериальная оптимизация осуществлялась с использованием метода последовательных уступок; использовалась скаляризация критериев по результатам решения однокритериальных задач (контрольные показатели).

5. Нечеткие модели в прогнозировании свойств: структурная идентификация

Традиционные методы детерминированного или статистического моделирования по управлению структурой и свойствами материалов малоэффективны: синтез математических моделей композиционных материалов осуществляется в условиях неопределенности; модели являются сложными и нелинейными; связи между переменными недостаточно изучены; помехи и погрешности измерения значительны и др. Известен и подход к моделированию на основе нечеткой кластеризации, связанной с задачей определения исходной структуры системы. Здесь предлагается новый подход к синтезу материалов, в известной мере являющийся и прототипом решения задач идентификации и управления качеством материалов с регулируемой структурой и свойствами. Он представляет одну из возможных методологий конструирования системы, которую можно рассматривать и как некую модификацию методики ПАТТЕРН (основа – общая формулировка технического задания на проектирование). Отметим, с увеличением сложности и стоимости проектирования, трудоемкости изготовления, времени полного цикла создания материалов нового поколения цель проектирования остается прежней, но меняется подход и методология проектирования: разработка (синтез) проекта осуществляется методом моделирования (разработка частных моделей для описания отдельных свойств системы). Композит рассматривается как конечное множество моделей, отражающих определенную грань его сущности: каждое из свойств исследуется по одной или нескольким упрощенным (узко ориентированным) моделям. Нарастание множества упрощенных моделей позволяет выявить новые свойства (часто и без построения обобщенной модели). В частности, формирование основных физико-механических характеристик композитов нами рассматривалось как задача ретроспективной идентификации динамических систем; условия флокуляции в дисперсной системе – на основе ее представления как системы частиц, движущихся под действием сил гравитационного и парного взаимодействий [9], взаимодействия с границами и дисперсионной средой и др. Композит рассматривается как комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношения принимают характер взаимного содействия компонентов на получение полезного результата [10...12].

К сожалению, нередко приходится использовать специальные методы идентификации с разработкой функционалов качества: в силу некорректности обратных задач определение неизвестных параметров необходимо производить на основе сравнения значений функциональных и структурных характеристик сложных систем, установленных экспериментально и в результате моделирования (нами результаты

сравнения использовались при определении необходимых поправок к первоначальным значениям параметров, исходя из обеспечения требуемой точности определения неизвестных параметров).

6. Проектирование сложных систем

Проект представляет собой ряд зависимостей между целями проектирования, возможными целями их достижения, окружающей средой и ресурсами. Его можно рассматривать и как сложную модель, отражающую все интересующие свойства будущей реальной системы. Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средство достижения целей проектирования) осуществляется на основе некоторого показателя (критерия выбора), обобщенно характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. На этом этапе система рассматривается как совокупность взаимосвязанных, управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования для решения заданной проблемы в некотором диапазоне условий. При выборе рационального варианта и оптимизации его параметров желательно учесть показатель «эффективность – стоимость» (соотношение между эффективностью решения поставленной задачи и суммарными затратами на решение: обеспечение максимальной эффективности при заданных затратах или обеспечение минимальной стоимости при заданном уровне эффективности). При проектировании системы с длительным периодом эксплуатации следует учитывать не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируемые изменения (долговечность): на систему влияют любые изменения внешней среды, а свойства внешней среды изменяются в результате работы системы. Наконец, так как изменения параметров любого из компонентов сложной системы вызывают изменение работы всей системы и ее выходных параметров, необходимо предусмотреть и возможные отказы (нарушение работоспособности) подсистем; обеспечить передачу функций одной подсистемы другой (в настоящее время широко используется при строительстве высотных зданий, стадионов и т.д.). Для этого можно предусмотреть резервирование подсистем (простейший случай – дублирование). Естественно, отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании функционирования проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть возможность ее различных модификаций.

Выводы

Дан ретроспективный анализ методов идентификации, управления и обработки экспериментальных данных по разработке композиционных материалов на основе изучения современного состояния и совершенствования методов синтеза систем.

Приведен опыт когнитивного моделирования как одного из способов исследования сложных слабоструктурированных систем со множеством противоречивых целей и критериев.

Указаны результаты использования хеометрического подхода, основанного на применении проекционных математических методов с возможностью выделения в больших массивах данных латентных переменных с последующим анализом связей в изучаемой системе.

Разработан специализированный язык *IPL* для обработки изображений.

Определены подходы и методологические принципы создания материалов с использованием методов системного анализа.

Предложена модификация методики ПАТТЕРН для синтеза материалов.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 14.
2. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик струк-

туры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.

3. Будылина, Е.А. Системный анализ: математические основы синтеза композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 30–43.

4. Гарькина, И.А. Метод главных компонент в управлении качеством материалов для защиты от ионизирующего излучения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2009. – Т. 16, № 2. – С. 306–307.

5. Данилов, А.М. Метод главных компонент: оценка качества покрытий / А.М. Данилов, В.И. Логанина, В.А. Смирнов // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 31–32.

6. Данилов, А.М. Язык обработки изображений: аппаратные расширения / А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Труды VIII международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO '09). – 2009. – С. 676–683.

7. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий с использованием методов цифровой обработки изображений / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, В.Г. Христолюбов // Пластические массы. – 2006. – № 1. – С. 44–46.

8. Данилов, А.М. Нейросетевые методы исследования в строительном материаловедении / А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.П. Прошин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 10 (538). – С. 28–34.

9. Гарькина, И.А. Флокуляция в дисперсных системах / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 2. – С. 344.

10. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P.32–36.

11. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.

12. Соколова, Ю.В. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего / Ю.В. Соколова, А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев, А.А. Чибисов // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 27–36.

References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of construction materials science / E.V. Korolev // Architecture and construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 14.

2. Chernyshov, E.M. The problem of complexity and consistency of qualitative description and statistical reliability of quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.

3. Budylna, E.A. System analysis: mathematical foundations of the synthesis of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №2 (55). – P. 30–43.

4. Garkina, I.A. Principal component method in quality management of materials for protection against ionizing radiation / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Review of Applied and Industrial Mathematics. – 2009. – Vol. 16, №2. – P. 306–307.

5. Danilov, A.M. Principal component method: assessment of the quality of coatings / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Regional architecture and engineering. – 2009. – №1. – P. 31–32.

6. Danilov, A.M. Image Processing Language: Hardware Extensions / A.M. Danilov, V.A. Smirnov // Proceedings of the VIII International Conference “System Identification and Control Problems” (SICPRO '09). – 2009. – P. 676–683.

7. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint and varnish coatings using digital image processing methods / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, V.G. Khristolubov // *Plastics*. – 2006. – № 1. – P. 44–46.
8. Danilov, A.M. Neural network research methods in construction materials science / A.M. Danilov, E.V. Korolev, V.A. Smirnov, A.P. Proshin // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2003. – №10 (538). – P. 28–34.
9. Garkina, I.A. Flocculation in dispersed systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.A. Smirnov // *Control systems and information technologies*. – 2009. – № 2. – P. 344.
10. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 723. – P.32–36.
11. Korolev, E.V. Analysis of structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N., Grishina A.M. Aizenstadt // *Construction materials*. – 2020. – № 9. – P. 54–61.
12. Sokolova, Yu.V. Assessment of the influence of recipe factors on the structure formation of a polymer-organic binder / Yu.V. Sokolova, A.M. Aizenstadt, E.V. Korolev, A.A. Chibisov // *Construction materials*. – 2020. – № 9. – P. 27–36.

УДК 666.91

DOI 10.54734/20722958_2024_2_30

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

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 54-90-41; факс: (4722) 30-99-91

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

*Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет*

Россия, 308015, г. Белгород,
ул. Победы, 85

Левицкая Ксения Михайловна,
младший научный сотрудник лаборатории
перспективных материалов и технологий,
аспирант кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
Белгородского государственного
технологического университета
им. В.Г. Шухова
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com,

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д.26

Бурьянов Александр Федорович,
доктор технических наук,
доцент, консультант кафедры
«Строительное материаловедение»
E-mail: rga-service@mail.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 54-90-41; fax: (4722) 30-99-91

Alfimova Natalya Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building Materials,
Products and Designs»
E-mail: alfimovan@mail.ru

Belgorod National Research University

Russia, 308015, Belgorod, 85, Pobedy St.

Levickaya Ksenia Mikhailovna,
Junior research associate Laboratory of
Advanced Materials and Technologies,
Graduate student of the department «Building
Materials, Products and Designs» of Belgorod
State Technological University named after
V.G. Shukhov
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoye shosse

Buryanov Aleksander Fedorovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Consultant of the department «Building
Materials Science»
E-mail: rga-service@mail.ru

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

Исследование выполнено при административной поддержке Научно-образовательного
центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» (г. Белгород)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ И СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ

Н.И. Алфимова, К.М. Левицкая, А.Ф. Бурьянов

Фосфогипс является одним из крупнотоннажных отходов, который образуется при производстве ортофосфорной кислоты. Одним из направлений утилизации данного отхода в строительной отрасли является производство одно- и многокомпонентных вяжущих различного твердения и сульфоалюминатного цемента. Представлены результаты проведенного обобщения мирового научного опыта использования фосфогипса в

качестве сырья для производства многокомпонентных вяжущих различного твердения, сделаны выводы о востребованности данного материала.

Ключевые слова: фосфогипс, щелочеактивированные вяжущие, геополимеры, суперсульфатированный цемент, сульфоалюминатный цемент

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

This work was realized under the administrative support of the Belgorod Scientific and Educational Center of the world-level «Innovative Solutions in the Agricultural Sector»

THE USE OF PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF MULTICOMPONENT BINDERS AND SULFOALUMINATE CEMENTS

N.I. Alfimova, K.M. Levitskaya, A.F. Buryanov

Phosphogypsum is one of the large-scale waste that is generated during the production of orthophosphoric acid. One of the directions for recycling this waste in the construction industry is the production of single- and multi-component binders of various hardenings and sulfoaluminate cement. This article summarizes the world scientific experience of using phosphogypsum as a raw material for the production of multicomponent binders of various hardenings, and draws conclusions about the relevance of this material.

Keywords: phosphogypsum, alkali-activated cementitious materials, geopolymer cement, supersulfated cement, sulfoaluminate cement

Введение. Производство фосфорной кислоты является стратегически важной мировой отраслью, так как она широко применяется в военной, энергетической, химической, пищевой промышленности, сельском хозяйстве и т.д. Ее получают термическим или мокрым способом из фосфатной породы [1]. Добыча и переработка фосфатов осуществляется во многих странах [2–14]. Побочным продуктом производства фосфорной кислоты является фосфогипс (ФГ), представляющий собой дигидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. По статистике, на каждую 1 т производимой в мире фосфорной кислоты приходится примерно 4,5–5,5 т ФГ [7–10], таким образом, ежегодно в мире образуется порядка 300 млн т данного отхода, при этом примерно 58 % ФГ складировается, 28 % – сбрасывается в прибрежные воды и только 14 % – утилизируется [8, 10, 16]. Сложившаяся ситуация предполагает поиск и разработку путей переработки или повторного использования фосфогипса. В настоящее время наиболее проработанными направлениями являются сельское хозяйство [8, 11, 12], выделение редкоземельных элементов [13, 14] и производство строительных материалов, в том числе различного вида вяжущих [7, 8, 10, 16].

Ранее был сделан анализ использования фосфогипса в качестве сырья для производства однокомпонентных вяжущих [17]. Целью исследований являлось обобщение научных данных в области использования фосфогипса в качестве сырья для производства многокомпонентных вяжущих различного твердения, а также в качестве компонента сырьевой смеси для получения сульфоалюминатного цемента.

Методология. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и обобщения данных из открытых источников, представленных на портале научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, а также из классических полнотекстовых журналов издательства Elsevier на платформе ScienceDirect за 2000–2023 годы. В связи с большим объемом исследований по щелочеактивированным вяжущим период анализа литературных источников составил 5 лет (2019–2023 гг.).

С целью выявления географии исследований в обязательном порядке фиксировалось местоположение источника происхождения фосфогипса – предприятие (при наличии), город, регион, страна. В случае отсутствия этой информации в тексте статьи

указывалась страна, которая может быть источником фосфогипса по мнению авторов исследования.

Основная часть. Анализ литературных источников показал, что фосфогипс используется в качестве сырья для производства многокомпонентных вяжущих, активированных щелочами (щелочеактивированные вяжущие) и твердеющих после затворения водой (композиционные вяжущие), а также в качестве компонента сырьевой смеси для получения сульфоалюминатного цемента.

1. Щелочеактивированные вяжущие

Щелочеактивированные вяжущие в настоящее время рассматриваются как альтернатива портландцементу, их использование обеспечивает определенное решение экологических проблем рационального природопользования и энергосбережения. Производство данного вида вяжущих осуществляют путем щелочной активации алюмосиликатного сырья природного и техногенного происхождения высокощелочными растворами гидроксидов, силикатов или карбонатов. К щелочеактивированным вяжущим также относятся геополимеры, которые получают из природного метакеолина или летучей золы с низким содержанием кальция [18].

Анализ литературных источников показал, что использование ФГ в составе щелочеактивированных вяжущих позволяет получить композиты с прочностью на сжатие в возрасте 28 суток от 30 до 79 МПа (табл. 1) [19–31]. Также необходимо отметить, что помимо использования ФГ в естественном состоянии (дигидрат сульфата кальция) [19, 20, 22–31] рассматривалось получение геополимеров с ФГ в форме β -полугидрата, в данном случае для регулирования сроков схватывания использовался замедлитель – лимонная кислота [31].

Т а б л и ц а 1

Состав и свойства щелочеактивированных вяжущих

Местоположение источника фосфогипса	Вид и состав вяжущего композита*	Механические свойства в возрасте 28 суток	Источник информации
1	2	3	4
GangHua Co., Ltd. Ухань, Китай	Щелочеактивированное вяжущее Доменный гранулированный шлак (80–95 %) Фосфогипс (5–20 %) NaO (3 % от вяжущего)	Максимальная прочность на сжатие – 38,5 МПа	[19]
Источник не указан Джорф-Лас-Фар, Эль-Джадида Марокко	Кислый геополимер Аморфный метакеолин (получен путем прокалывания каолиновой глины при 750 °С 2 ч) Фосфогипс (0,05–50 %) Раствор 85 мас. % технической H_3PO_4	Прочность на сжатие – 40,14–48,43 МПа Прочность на изгиб – 5,13–9,1 МПа	[20]
Hubei Sanning Chemical Co., Ltd. Провинция Хубэй, Китай	Геополимер Шлак (40–50 %) Зола-унос (2–10 %) β -полугидрат из фосфогипса (50 %) Метасиликата натрия (6–10 %) Лимонная кислота (0,2–0,5 %)	Прочность на сжатие – 60 МПа	[21]
AB Lifosa Кедайняй, Литва	Геополимер Отходы красного кирпича (0–100 %) Метакеолин (0–100 %) Фосфогипс (5 % от массы.) NaOH	Максимальная прочность на сжатие – 31,5 МПа	[22]
Wuhan VCEM Technology Development Co. Ltd Китай	Щелочеактивированное вяжущее Доменный гранулированный шлак (90 %) Фосфогипс (10 %) Наноэтрингит (1–5 %) NaOH/Na ₂ SiO ₃	Прочность на сжатие – 45,6–79,0 МПа	[23]

1	2	3	4
Источник не указан Провинция Хубэй, Китай	Щелочеактивированное вяжущее Зола-унос (50 %) Доменный гранулированный шлак (42,5–47,5 %) Фосфогипс (2,5–7,5 %) NaOH/Na ₂ SiO ₃ BaCl ₂ (замедлитель)	Максимальная прочность на сжатие – 56 МПа	[24]
Sakefu Qinhuangdao Chemical Fertilizer Ltd Китай	Щелочеактивированное вяжущее Летучая зола от сжигания твердых бытовых отходов (30 %) Доменный гранулированный шлак (45–60 %) Зола-унос (10–30 %) Фосфогипс (5–15 %) NaOH	Максимальная прочность на сжатие – 31,1 МПа	[25]
Источник не указан Китай	Щелочеактивированное вяжущее Зола-унос (35–50 %) Доменный гранулированный шлак (50 %) Фосфогипс и β-полугидрат из фосфогипса (5–15 %) NaOH/Na ₂ SiO ₃	Максимальная прочность на сжатие – 52,47 МПа	[26]
Company in Shandong Китай	Щелочеактивированное вяжущее Красный шлам* (16,7–33,3 %) Фосфогипс (16,7–33,3 %) Доменный гранулированный шлак (40–50 %) Зола-унос (5 %) Микрокремнезем (5–10 %) NaOH/Na ₂ SiO ₃	Максимальная прочность на сжатие – 41,1 МПа	[27]
Источник не указан Литва	Геополимер Зольный остаток биомассы Фосфогипс (15 %) NaOH	Прочность на сжатие до 30 МПа	[28]
Источник не указан Гданьск, Польша	Щелочеактивированное вяжущее Доменный гранулированный шлак (90 %) Фосфогипс (10 %) NaOH	Максимальная прочность на сжатие – 41,8 МПа	[29]
Источник не указан Габес, Тунис	Геополимер красная глина (прокаленная при 850 °C) Фосфогипс (4 %, 8 %, 12 %, 16 %) NaOH	Максимальная прочность на сжатие – 36 МПа	[30]
Источник не указан Гданьск, Польша	Щелочеактивированное вяжущее Доменный гранулированный шлак (90 %) Фосфогипс (10 %) NaOH/Na ₂ SiO ₃	Максимальная прочность на сжатие – 78,9 МПа	[31]

* Вид вяжущего обозначался исходя из того, как его позиционировали авторы статьи.

**Красный шлам – щелочной побочный продукт глиноземной промышленности.

Фосфогипс в щелочеактивированных вяжущих выступает в качестве источника щелочи. В качестве положительных эффектов использования в составе щелочеактивированных вяжущих ФГ авторы выделяют:

– снижение аутогенной усадки и усадки при высыхании за счет этtringита, образующегося в системе;

- снижение пористости и повышение плотности вяжущего;
- формирование более однородной структуры композита;
- увеличение степени полимеризации продуктов $CA-S-H$;
- замедление периода ускорения процесса гидратации;
- сокращение сроков схватывания.

2. Композиционные вяжущие

Многочисленные исследования показали, что основными проблемами β -полугидрата фосфогипса являются: низкая прочность и водостойкость, обусловленные их повышенной водопотребностью. Одним из путей устранения этих недостатков является создание композиционных вяжущих (КВ), которые представляют собой системы, получаемые путем смешения в определенных процентных соотношениях тонкодисперсных минеральных компонентов (фосфогипс, золы, шлаки, цементы, опока, терпел и т.д.), а также, при необходимости, различных химических модификаторов, регулирующих водопотребность и сроки схватывания КВ.

В зависимости от вида, количества компонентов и условий твердения прочность на сжатие получаемого композита в возрасте 28 суток составляет от 2 до 72 МПа, коэффициент размягчения – до 0,85 (табл. 2) [32–43].

Т а б л и ц а 2

Состав и свойства композиционных вяжущих

Местоположение источника фосфогипса	Состав композиционного вяжущего	Механические свойства в возрасте (28 сут)*	Источник информации
1	2	3	4
Chuxing Chemical Co., Ltd. Провинция Хубэй, Китай	β -полугидрат из фосфогипса (57 %) Портландцемент (0–30 %) Зола-унос (0–30 %) Рисовая шелуха (13 %) Модификаторы (0,4 %)	Максимальная прочность на изгиб – 4,6 МПа Максимальная прочность на сжатие – 6,1 МПа Максимальные значения коэффициента размягчения – 0,66	[32]
Xinyangfeng Fertilizer Co., Ltd Провинция Хубэй, Китай	β -полугидрат из фосфогипса (60 %) Молотый доменный шлак (30 %) Сталеплавильный шлак (10 %) Модификатор – синтезированный трехкальциевый алюминат (0–4 %) Замедлитель схватывания (лимонная кислота) Муперпластификатор	Максимальная прочность на сжатие – 42,5 МПа	[33]
Xinyangfeng Fertilizer Co., Ltd Провинция Хубэй, Китай	β -полугидрат из фосфогипса (60–100 %) Доменный гранулированный шлак (0–40 %) Сталеплавильный шлак (0–40 %) Суперпластификатор поликарбоксилатный	Максимальная прочность на сжатие – 32,5 МПа Максимальные значения коэффициента размягчения – 0,8	[34]
Источник не указан Провинция Хубэй, Китай	Портландцемент (73,49 %) Фосфогипс (8,25–18,26 %) Зола-унос (8,25–18,26 %) Суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира (0,91–1,03 %)	Прочность на сжатие: 3 сут – 11,5–51,6 МПа 7 сут – 20,8–64,8 МПа 28 сут – 29,3–72,4 МПа 90 сут – 42,7–87,1 МПа 180 сут – 58,6–92,1 МПа	[35]
Источник не указан, авторы из нескольких стран	β -полугидрат из фосфогипса Доменный гранулированный шлак (5–25 %) Портландцемент (15 %) Суперпластификатора (0,1 %) Замедлитель схватывания (лимонная кислота – 0,02 и 0,1 %)	Максимальная прочность на сжатие – 38,6 МПа Максимальная прочность на изгиб – 6,5 МПа Максимальные значения коэффициента размягчения – 0,7	[36]

1	2	3	4
АО «Невин- номысский Азот» Невинномысск, Россия	Шлак (50–90 %) Фосфогипс (10–50 %) Известь (масс. % ФГ)	Прочность на сжатие – 2–12,5 МПа	[37]
ООО «Балаковские минеральные удобрения» Балаково, Россия	Фосфогипс (77,0–87,5 %) Стеарат цинка (2,5–3,0 %) Кремнезёмсодержащий компонент: опока, трепел, диатомит (10,0–20,0 %)	Прочность на сжатие – 17,5–20 МПа Коэффициент размягчения – 0,81–0,85	[38]
ОАО «Северсталь» Череповец, Россия	Доменный гранулированный шлак (90 %) Фосфогипс (10 %) Доменный гранулированный шлак (48,27; 56 %) Сталеплавильный шлак (13,2; 8,4 %) Фосфогипс (38,54; 35,6 %)	Прочность на изгиб – 4,06 МПа Прочность на сжатие – 20,5 МПа Прочность на изгиб – 4,56; 5,89 МПа Прочность на сжатие – 25,47; 26,7 МПа	[39]
«Ровно-Азот» Украина	Доменный гранулированный шлак (85 %) Фосфогипс (10 %) Портландцемент (5 %) Дополнительное введение модификаторов Melflux-2561 (0,4 %) + CaCl ₂ (0,2 %)	Прочность на изгиб – 10,36 МПа Прочность на сжатие – до 36,38 МПа Прочность на изгиб – 14,32 МПа Прочность на сжатие – 66,39 МПа	[40]
M/s Rashtriya Chemicals & Fertilizers, Мумбаи, Индия	Зола-унос (40 %) α -полугидрат фосфогипса (30 %) Гашеная известь (30 %) Гранулированный шлак (50 %) α -полугидрат из фосфогипса (22,5 %) Мраморная пыль (15 %) Гашеная известь (12,5 %) Химический активатор (1 %)	Прочность на сжатие в зависимости от температуры твердения (27, 40, 50 °C) 7,2; 22,3; 26,4 МПа 20,6; 22,4; 32,2 МПа	[41]
Huangmailing Phosphoric Chemical Group Corp. Провинции Хубэй Китай	Фосфогипс (25–65 %) Измельченный доменный шлак (22,2–47,8 %) Сталелитейный шлак (5–20 %) Известняк (6,4–13,6 %)	Максимальная прочность на изгиб – 8,4 МПа Максимальная прочность на сжатие – 48 МПа	[42]
Gabes Skhira, Тунис	Фосфогипс (70 %) Кальций-сульфоалюминатный клинкер (30 %)	Прочность на сжатие – 15 20 МПа	[43]
Источник не указан Гуйчжоу Венфу Китай	Зола-унос (65–85 %) Известь (15–35 %) β -полугидрат из фосфогипса (8 % по массе) твердение при 45 °C при относи- тельной влажности более 90 %	Прочность на сжатие: 3 сут – 2,4–6,89 МПа 7 сут – 4,61–11,12 МПа 28 сут – 5,93–16,45 МПа 90 сут – 6,31–19,83 МПа	[44]

* В основном физико-механические характеристики композиционных вяжущих определялись в возрасте 28 суток за исключением исследований, приведенных в работах [35] и [44].

Фосфогипс в составе композиционных вяжущих вводится как в виде дигидрата, так и в виде β -полугидрата. Во втором случае для регулирования водопотребности и сроков схватывания использовались суперпластификаторы и замедлители схватывания [32–34, 36]. Содержание ФГ в составе композиционных вяжущих варьируется в широких пределах – от 10 до 87,5 %.

Данный вид вяжущих имеет гидратационный тип твердения, поэтому физико-механические характеристики композитов фиксировались через 2 ч, 3 сут, 7 сут и 28 сут. Авторами [35] также было установлено, что композиционные вяжущие, состоящие из фосфогипса, золы-уноса, портландцемента и суперпластификатора на основе поликарбоксилатного эфира, продолжают набирать прочность после 28 суток, и к 90 суткам их прочность возрастает в 1,2–1,5 раза, а к 180 суткам – в 1,3–2 раза. В работе [43] отмечено, что известково-зольное вяжущее, содержащее в своем составе 8 % β -полугидрата фосфогипса, продолжает набирать прочность после 28 суток твердения; в данном исследовании также выявлено положительное влияние твердения композита в условиях повышенной влажности 90 % и температуре 45 °С.

В зарубежной литературе отдельно выделяют суперсульфатированный/суперсульфатный цемент (ССЦ) (Supersulfated/Super sulfate cement (SSC)), который исходя из его состава также можно отнести к композиционным вяжущим, твердеющим после затворения водой. ССЦ является разновидностью экологически чистого цемента и представляет собой необожженное вяжущее с низким содержанием портландцементного клинкера или без него. Обычно ССЦ состоит из 75–85 % измельченного доменного гранулированного шлака, 10–20 % сульфата (дигидрат гипса, фосфогипса и др.) и 1–5 % щелочного активатора (цементный клинкер, гидроксид кальция, известь и др.). Данный вид цемента, помимо экологичности, отличается высокими физико-механическими характеристиками, особенно на позднем сроке, низкими тепловыделениями при гидратации, а бетон на ССЦ характеризуется отличной стойкостью к воздействию щелочей сульфатов [45].

Анализ литературных источников показал, что прочность на сжатие ССЦ с фосфогипсом в возрасте 28 суток составляет 40–50 МПа, 90 суток – 55–60 МПа, обжиг ФГ и обработка его раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$ оказывают положительное влияние на свойства (пористость, плотность, прочность) конечного продукта, что обусловлено нейтрализацией вредных примесей, находящихся в составе ФГ [46–50] (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Состав и свойства суперсульфатированного цемента

Местоположение источника фосфогипса	Состав композиционного вяжущего (способ модификации ФГ)	Механические свойства в возрасте 28 сут.	Источник информации
1	2	3	4
Zhongdong Phosphate Technology Co., Ltd Ухань, Китай	Доменный гранулированный шлак (80 %) Портландцемент (5 %) Фосфогипс (15 %) (обжиг 150 °С, 350 °С, 600 °С и 800 °С в течение 0,5 ч, 1 ч, 1,5 ч и 2 ч.)	Максимальная прочность на сжатие – 54,5 МПа (28 сут.) Максимальная прочность на сжатие – 53,9 МПа (90 сут.)	[46]
Источник не указан Бразилия	Доменный гранулированный шлак (85 %) Портландцемент (5 %) Фосфогипс (10 %) (обжиг при 650 °С 1 ч.)	Прочность на сжатие $\approx$ 27 МПа (84 сут.) Прочность на изгиб $\approx$ 6 МПа (84 сут.)	[47]
Zhongdong Phosphate Technology Co., Ltd. Ухань, Китай	Доменный гранулированный шлак (85 %) Портландцемент (5 %) Фосфогипс (15 %) (нейтрализация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0–8 %)	Прочность на сжатие 35,52–50,32 МПа (28 сут.) Прочность на сжатие 29,48–53,65 МПа (90 сут.)	[48]

1	2	3	4
Zhongdong Phosphate Technology Co., Ltd. Ухань, Китай	Доменный гранулированный шлак (81 %) Портландцемент (3 %) Алюминатный цемент (1 %) Фосфогипс (15 %) (обжиг при 500 °С или нейтрализация 4,00 %-й известью)	Максимальная прочность на сжатие – 48 МПа (28 сут.) Максимальная прочность на сжатие – 58 МПа (90 сут.)	[49]

Кроме перечисленных выше достоинств ССЦ, характерных для ССЦ на природном гипсе, ССЦ с ФГ отличается более высокой стойкостью к проникновению ионов хлорида по сравнению с бетонами на портландцементе. Однако высокий коэффициент карбонизации ограничивает их использование в промышленных условиях (с высоким содержанием CO_2) [50].

3. Сульфоалюминатный цемент

Сульфоалюминатный цемент (САЦ) и его разновидности: кальциевый сульфоалюминатный цемент, белитсульфоалюминатный цемент – это специальный вид цемента, отличительной особенностью которого является более низкая (1200–1300 °С) по сравнению с портландцементом (1450 °С) температура обжига клинкера и, как следствие, более низкие выбросы углекислого газа в атмосферу. Помимо всего прочего, САЦ отличается быстрым набором прочности, отсутствием усадки при твердении, высокой морозостойкостью, огнестойкостью и стойкостью в условиях сульфатной коррозии. К основным недостаткам данного вида цемента необходимо отнести ограниченность природной алюмосодержащей сырьевой базы (глинозем) и, как следствие, его высокую цену [51]. Однако в настоящее время существует большое количество исследований, в которых рассматривается получение САЦ с использованием отходов производств, выступающих альтернативой природному сырью. В качестве источника алюминия рассматриваются зола и шлаки, в качестве источника оксида кальция – гипсосодержащие отходы, в том числе фосфогипс.

Фосфогипс может рассматриваться как в качестве вспомогательного [52–56, 58–61], так и в качестве единственного источника оксида кальция [55, 57] при получении клинкера, а также дополнительно в качестве добавки, регулирующей сроки схватывания сульфоалюминатного цемента [55] (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Состав сырьевой шихты и свойства сульфоалюминатного цемента

Местоположение источника фосфогипса	Состав сырьевой смеси для получения клинкера	Механические свойства в возрасте 28 сут.	Источник информации
1	2	3	4
Уага (Сиилинъярви, Финляндия)	Ковшовый шлак (68,1 %) Фосфогипс (11,5 %) Известняк (8,6 %) *Fe-шлак (3,8 %) Глина (3,8 %)	Изучалось влияние условий и состава на фазообразование клинкера и выбросы CO_2	[52]
Источник не указан Россия	Известняк (59,29; 53,25; 50,52 %) Фосфогипс (8,26; 19,0; 23,86 %) Шлак (17,45; 12,75; 10,62 %) Глина (15 %)	Прочность на сжатие 22,5–31,5 МПа	[53]
Wengfu Group, Гуйчжоу, Китай	Зола-унос (40,34–44,92 %) CaCO_3 (38,33–44,61 %) Фосфогипс (8,63–9,61 %) SiO_2 (6,41–7,14 %)	Образцы 4×4×4 см Прочность на сжатие 36–53 МПа	[54]

1	2	3	4
Shandong Huitai Co., Ltd., Биньчжоу, Китай	Фосфогипс (71,09–75,4 %) Алюминиевый шлак (13,9–27,5 %) Зола-унос (1,41–10,7 %)	Прочность на сжатие 87–115 МПа Образцы 2×2×2 см	[55]
ОАО «Воскресенские минудобрения» Воскресенск, Россия	Отсев известняковый (50,78–51,19 %) Шлак алюминиевый (39,16; 40,10 %) или Боксит архангельский (39,71; 38,67 %) Фосфогипс (8,47; 9,51 %)	Прочность на сжатие ≈25 МПа Прочность на изгиб ≈11,2 МПа	[56]
Источник не указан Россия	Известняк (49,51–51,55 %) Алюминатный шлак (29,43–30,54 %) Бокситы (5; 10 %) Фосфогипс (13,46; 12,84 %)	Прочность на сжатие (7 сут.) 16,5 МПа Прочность на изгиб (7 сут.) 8,2 МПа	[57]
Shandong Huitai Co., Ltd., Биньчжоу, Кита	Фосфогипс (72,75 %) Алюминиевый шлак (22,28 %) Зола-унос (4,97 %)	Образцы 2×2×2 см Прочность на сжатие 99,3 МПа	[58]
Yunnan Sanhuan Chemical Co. LTD в Китае	Известняк (86,27 %) Бокситы (32,99 %) Фосфогипс (17,77 %) Зола-унос (15,4 %)	Образцы 2×2×2 см Прочность на сжатие ≈70 МПа	[59]
Источник не указан Россия	Известняк Боксит/алюминиевый шлак Фосфогипс 1000, 1100, 1300 и 1350°С с изотермической выдержкой 1 час	Прочность на сжатие 39,8–50,1 МПа	[60]
Источник не указан Юннань, Китай	Известняк (60,6 %) Фосфогипс (23,7 %) Бокситы (15,7 %)	Образцы 2×2×2 см Максимальная прочность 38 МПа	[61]

*Fe-шлак представляет собой термически обработанный ярозитовый остаток от производства цинка.

В России исследования, направленные на изучение возможности получения сульфоалюминатного цемента с использованием фосфогипса, ведутся на базе Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева [53, 56, 57, 60]. Помимо российских, большая часть исследований в данном направлении принадлежит китайским ученым.

Выводы. Проведенный анализ литературных источников позволил сделать следующие общие выводы:

1. Исследования, связанные с рассмотрением возможности использования фосфогипса в качестве сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатного цемента, проводятся в основном научными группами стран, в которых существует проблема, связанная с образованием и накоплением данного вида отхода. При этом наибольшее количество исследований, как и в случае с однокомпонентными вяжущими, принадлежит китайским ученым.

2. Объемы исследований в области производства щелочеактивированных вяжущих и геополимеров очень велики, что свидетельствует о востребованности данного материала. Использование в его составе фосфогипса имеет не только значительный экологический эффект, но и дает возможность получения изделий с высокими физико-механическими характеристиками. Однако несмотря на перспективность данного направления, в отечественной практике вопросы использования фосфогипса как компонента щелочеактивированных вяжущих не рассматривались.

3. Для производства композиционных вяжущих может использоваться фосfogипс как в форме дигидрата, так и полугидрата, а также широкий спектр минеральных компонентов (шлаки, золы, портландцемент и т.д.). Данный вид вяжущих отличается повышенной прочностью, а также коэффициентом размягчения (более 0,7), что существенно расширяет область их использования по отношению к однокомпонентным вяжущим из фосfogипса α - и β -модификации.

4. Суперсульфатированный цемент с использованием фосfogипса как разновидность композиционного вяжущего является перспективным материалом и имеет существенные преимущества перед портландцементом, обусловленные безобжиговой технологией, экологичностью, высокими физико-механическими характеристиками. Однако несмотря на перспективность и наличие сырьевой базы (доменный гранулированный шлак, фосfogипс), в отечественной практике исследования в данном направлении отсутствуют.

5. Количество фосfogипса, вводимого в состав многокомпонентных вяжущих, лежит в широком диапазоне от 5 до 87,5 %, при этом рассматривалось использование его как в форме дигидрата, так и полугидрата β - и α - модификации. Прочность на сжатие таких вяжущих, как правило, выше, чем у однокомпонентных, и лежит в пределах 20–92 МПа.

6. Получением сульфoалюминатного цемента и его разновидностей занимаются в основном отечественные и китайские ученые. Основным преимуществом данного вида цемента по сравнению с портландцементом является более низкая температура обжига клинкера, а следовательно, снижение выбросов CO_2 . Фосfogипс в таких вяжущих может использоваться как основной или дополнительный источник CaO в сырьевой смеси для получения клинкера, так и дополнительно в качестве добавки, регулирующей сроки схватывания.

7. Так же, как и при производстве однокомпонентных вяжущих, очистка фосfogипса от примесей на стадии предварительной подготовки способствует повышению качества конечного продукта.

Список литературы

1. Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production / X. Liu, F. Wu, G. Qu [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, Iss. 6. – 108868. – DOI:10.1016/j.jece.2022.108868.
2. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 122–123. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
3. Mineral Commodity Summaries, 2021. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 122–123. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
4. Mineral Commodity Summaries, 2022. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 124–125. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
5. Mineral Commodity Summaries, 2023. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 132–133. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>
6. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction / B.R.S. Calderón-Morales, A. García-Martínez, P. Pineda, [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – 102506. – DOI:10.1016/j.jobe.2021.102506.
7. One-step wet-process phosphoric acid by-product CaSO_4 and its purification / K. Fang, L. Xu, M. Yang [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2023. – Vol. 309. – 123048. – DOI:10.1016/j.seppur.2022.123048.
8. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
9. Иващенко, Т.Г. Фосфоритный фосfogипс: свойства, основные направления переработки и эколого-гигиеническая оценка / Т.Г. Иващенко, И.П. Крайнов // Экология и промышленность. – 2009. – №1(18). – С.59–64.

10. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourgier [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 414. – 137561. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.137561.
11. Муравьев, Е.И. Перспективы использования фосфогипса в сельском хозяйстве / Е.И. Муравьев, Е.П. Добрыднов, И.С. Белюченко // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. – 2008. – Т. 4, № 1. – С. 31–39.
12. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil / A.A. Al-Enazy, Al- F. Barakah, S. Al-Oud [et al.] // *Archives of Agronomy and Soil Science*. – 2018. – Vol. 64. – P. 1394–1406. – DOI:10.1080/03650340.2018.1437909
13. Получение диоксида церия из редкоземельного концентрата, выделенного из фосфогипса / А.А. Семенов, Ж.Н. Галиева, А.М. Абрамов [и др.] // *МНИЖ*. – 2016. – №5-3(47). – С.169–173. – DOI:10.18454/IRJ.2016.47.108
14. Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum / S.F. Lütke, D. Pinto, L.C. Brudi [et al.] // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. – 2023. – Vol. 191. – 109458. – DOI:10.1016/j.cep.2023.109458.
15. Murali, G. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: Review / G. Murali, M. Azab // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 960–987. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.05.272.
16. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2020. – № 11. – С. 8–23. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
17. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих / К.М. Левицкая, Н.И. Алфимова, А.Ф. Бурьянов [и др.] // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – №1 (58). – С.82–98.
18. A literature review of the latest trends and perspectives regarding alkali-activated materials in terms of sustainable development / A. Ślosarczyk, J. Fořt, I. Klapiszewska [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 5394–5425. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.07.038.
19. Effects of the phosphogypsum on the hydration and microstructure of alkali activated slag pastes / M. Wu, W. Shen, X. Xiong [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – 130391. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130391.
20. Valorization of phosphogypsum waste through acid geopolymer technology: synthesis, characterization, and environmental assessment / H. Majdoubi, R. Makhlof, Y. Haddaji [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 371. – 130710. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130710.
21. Development and optimization of phosphogypsum-based geopolymer cement / Y. Wang, H. Huo, B. Chen [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 369. – 130577. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130577
22. Mechanical properties and microstructure of ternary alkali activated system: Red brick waste, metakaolin and phosphogypsum / M. Statkauskas, D. Vaičiukynienė, A. Grinys [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 387. – 131648. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.1316
23. The mechanical properties and sustainability of phosphogypsum-slag binder activated by nano-ettringite / J. Wang, X. Deng, H. Tan [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2023. 166015. – DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.16601
24. Effects of phosphogypsum substitution on the performance of ground granulated blast furnace slag/fly ash-based alkali-activated binders / Y. Feng, Z. Xue, B. Zhang [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 70. – 106387. – DOI:10.1016/j.job.2023.106387
25. A novel binder prepared from municipal solid waste incineration fly ash and phosphogypsum / S. Wang, C. Xue, Q. Zhao [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 71. – 106486. – DOI:10.1016/j.job.2023.106486

26. Shrinkage mitigation of alkali-activated fly ash/slag mortar by using phosphogypsum waste / Y. Zheng, D. Xuan, B. Shen [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 375. – 130978. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130978
27. Investigation on properties and mechanism of non-calcined Bayer red mud-phosphogypsum cementitious binder / J. Xu, F. Xu, Y. Wu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 379, Part 1. – 134661. – DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134661.
28. Alkali Activated Paste and Concrete Based on of Biomass Bottom Ash with Phosphogypsum / D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė, A. Kantautas [et al.] // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – 5190. – DOI:10.3390/app10155190
29. Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate-activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbelsa, Y. Pontikesb, P. Samync [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2020. – Vol. 132. – 1060. – DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106054
30. Hamdi, N. Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes / N. Hamdi, I.B. Messaoud, E. Srasra // *Comptes Rendus Chimie*. – 2019. – Vol. 22 (2–3). – P. 220–226. DOI:10.1016/j.crci.2018.11.010.
31. Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbels, R.I. Iacobescu, Y. Pontikes [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 215. – P. 371–380. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.194
32. Influence of cement on properties of calcined phosphogypsum based composite cementitious materials / F. Deng, J. Ye, Y. Liu [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 24. – P. 3145–3156. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.03.194.
33. Utilization of tricalcium aluminate as modifier on phosphogypsum-based full solid-waste cementitious material / P. Chen, B. Ma, H. Tan [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 377. – 131034. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131034.
34. Improving the mechanical property and water resistance of β -hemihydrate phosphogypsum by incorporating ground blast-furnace slag and steel slag / P. Chen, B. Ma, H. Tan [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 344. – 128265. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128265.
35. Hydration mechanism and thermodynamic simulation of ecological ternary cements containing phosphogypsum / J. Hou, X. He, X. Ni [et al.] // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 33. – 104621. – DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.104621
36. Mechanical strength, water resistance and drying shrinkage of lightweight hemihydrate phosphogypsum-cement composite with ground granulated blast furnace slag and recycled waste glass / L. Zhang, K.H. Mo, S.P. Yap [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 345. – 128232. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128232.
37. Багдасаров, А.С. Использование отходов промышленности для производства шлако-известково-гипсового вяжущего / А.С. Багдасаров, А.И. Нестеренко // *Инженерный вестник Дона*. – 2020. – № 3(63). – С. 35.
38. Производство гипсопуццоланового вяжущего повышенной водостойкости / А.В. Страхов, Ю.Г. Иващенко, С.А. Евстигнеев [и др.] // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. – 2016. – № 2(16). – URL: trts.esrae.ru/ru/31-160 (дата обращения: 09.08.2023).
39. Каптюшина, А.Г. Проектирование состава композиционного безобжигового вяжущего на базе техногенных отходов Череповецкого промышленного узла и исследование его технических характеристик / А.Г. Каптюшина, Г.В. Бондаренко // *Химическая промышленность сегодня*. – 2011. – № 11. – С. 37–41.
40. Сульфатно-шлаковые вяжущие повышенной прочности и долговечности / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, А.В. Мироненко [и др.] // *Сухие строительные смеси*. – 2011. – № 3. – С. 36–38.
41. Garg, M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders / M. Garg, N. Jain, M. Singh // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23(10). – P. 3138–3143. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.

42. Huang, Y. Investigation on phosphogypsum-steel slag-granulated blast-furnace slag-limestone cement / Y. Huang, Z.S. Lin // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24(7). – P. 1296–1301. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.006.
43. Valorization of phosphogypsum as hydraulic binder / T. Kuryatnyk, C.A. da Luz, J. Ambroise [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 160(2–3). – P. 681–687. – DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.03.014.
44. Min, Y. Activation of fly ash–lime systems using calcined phosphogypsum / Y. Min, Q. Jueshi, P. Ying // *Construction and Building Materials*. – 2008. – Vol. 22(5). – P. 1004–1008. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.005.
45. Wu, Q. Research status of super sulfate cement / Q. Wu, Q. Xue, Z. Yu // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 294. – 126228. – DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126228.
46. Liu, S. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement / S. Liu, J. Ouyang, J. Ren // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 24320. – 118226. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118226
47. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate / S.R. Pinto, da Luz C.A., G.S. Munhoz [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2020. – Vol. 36. – 106172. – DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106172.
48. Liu S., Fang P., Ren J., Li S. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement / S. Liu, P. Fang, J. Ren [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 272. – 122660. – DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122660.
49. Liu, S. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement / S. Liu, L. Wang, B. Yu // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 21430. – P. 9–16. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052
50. Pinto, S.R. Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress / S.R. Pinto, C.A. da Luz, G.S. Munhoz [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 263. – 120640. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120640.
51. Evaluation of mechanical properties and abrasion resistance of PAN fiber-reinforced sulfoaluminate cement composites / J. Wang, R. Zhang, L. Lu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – e01973. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e01973
52. Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterization / V. Isteri, K. Ohenoja, T. Hanein [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2022. – Vol. 154. – 106715. – DOI:10.1016/j.cemconres.2022.106715
53. Серпичев, А.С. Использование техногенных отходов при получении белитсульфоалюминатного цемента / А.С. Серпичев, Л.И. Сычева // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2022. – Т. 36, № 3. – С. 130–133.
54. Li, Z. Using alumina-rich sludge and phosphogypsum manufactures low-CO₂ cement / Z. Li, L. Huang, S. Wang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 288. – 123016. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123016.
55. Сотникова, Е.Т. Цементы на основе сульфатированных клинкеров / Е.Т. Сотникова, Д.Д. Данилович, Е.Н. Потапова // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2021. – Т. 35, № 14(249). – С. 19–21.
56. Мясников, А. К. Синтез сульфоалюминатного цемента и исследование его свойств / А.К. Мясников, Л.И. Сычева // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2021. – Т. 35, № 4(239). – С. 70–72.
57. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects / S. Wu, X. Yao, C. Ren [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 271. – 110986. – DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110986.
58. Co-preparation of calcium sulfoaluminate cement and sulfuric acid through mass utilization of industrial by-product gypsum / S. Wu, Y. Yao, X. Yao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 265. – 121801. – DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121801.

59. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P_2O_5 and F on the clinker formation and cement performances / Y. Huang, J. Qian, X. Kang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 203. – P. 432–442. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.112
60. Ивашина, М.А. Использование отходов промышленности в технологии сульфоалюминатного клинкера / М.А. Ивашина, Ю.П. Кривобородов // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2017. – Т. 31, № 1. – С. 22–24.
61. Synthesis of belite sulfoaluminate-ternesite cements with phosphogypsum / Y. Shen, J. Qian, Y. Huang [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 63. – P. 67–75. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2015.09.003.

References

1. Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production / X. Liu, F. Wu, G. Qu [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10, Iss. 6. – 108868. – DOI:10.1016/j.jece.2022.108868.
2. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 122–123. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
3. Mineral Commodity Summaries, 2021. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 122–123. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
4. Mineral Commodity Summaries, 2022. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 124–125. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
5. Mineral Commodity Summaries, 2023. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, P. 132–133. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>
6. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction / B.R.S. Calderón-Morales, A. García-Martínez, P. Pineda [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 44. – 102506. – DOI:10.1016/j.jobbe.2021.102506.
7. One-step wet-process phosphoric acid by-product $CaSO_4$ and its purification / K. Fang, L. Xu, M. Yang [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 309. – 123048. – DOI:10.1016/j.seppur.2022.123048.
8. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
9. Ivashchenko, T.G. Phosphorite phosphogypsum: properties, main directions of processing and environmental and hygienic assessment / T.G. Ivashchenko, I.P. Krainov // *Ecology and industry*. – 2009. – No. 1 (18). – P. 59–64.
10. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourcier [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 414. – 137561. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.137561.
11. Muravyov, E.I. Prospects for the use of phosphogypsum in agriculture / E.I. Muravyov, E.P. Dobrydnev, I.S. Belyuchenko // *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. – 2008. – Vol. 4, No. 1. – P. 31–39.
12. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil / A.A. Al-Enazy, Al- F. Barakah, S. Al-Oud [et al.] // *Archives of Agronomy and Soil Science*. – 2018. – Vol. 64. – P. 1394–1406. – DOI:10.1080/03650340.2018.1437909
13. Obtaining cerium dioxide from a rare earth concentrate isolated from phosphogypsum / A.A. Semenov, Zh.N. Galieva, A.M. Abramov [et al.] // *MNIZH*. – 2016. – No. 5–3 (47). – P. 169–173. – DOI:10.18454/IRJ.2016.47.108
14. Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum / S.F. Lütke, D. Pinto, L.C. Brudi [et al.] // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. – 2023. – Vol. 191. – 109458. – DOI:10.1016/j.cep.2023.109458.

15. Murali, G. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: Review / G. Murali, M. Azab // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 960–987. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.05.272.
16. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin [et al.] // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. 11. 8–23. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
17. Use of phosphogypsum as a raw material for the production of one-component binders / K.M. Levickaya, N.I. Alfimova, A.F. Buryanov, I.S. Nikulin // *Regional architecture and construction*. – 2024. – №1 (58). – P.82–98.
18. A literature review of the latest trends and perspectives regarding alkali-activated materials in terms of sustainable development / A. Ślosarczyk, J. Fořt, I. Klapiszewska [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 5394–5425. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.07.038.
19. Effects of the phosphogypsum on the hydration and microstructure of alkali activated slag pastes / M. Wu, W. Shen, X. Xiong [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – 130391. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130391.
20. Valorization of phosphogypsum waste through acid geopolymer technology: synthesis, characterization, and environmental assessment / H. Majdoubi, R. Makhlof, Y. Haddaji [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 371. – 130710. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130710.
21. Development and optimization of phosphogypsum-based geopolymer cement / Y. Wang, H. Huo, B. Chen [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 369. – 130577. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130577
22. Mechanical properties and microstructure of ternary alkali activated system: Red brick waste, metakaolin and phosphogypsum / M. Statkauskas, D. Vaičiukynienė, A. Grinys [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 387. – 131648. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.1316
23. The mechanical properties and sustainability of phosphogypsum-slag binder activated by nano-ettringite / J. Wang, X. Deng, H. Tan [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2023. 166015. – DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.16601
24. Effects of phosphogypsum substitution on the performance of ground granulated blast furnace slag/fly ash-based alkali-activated binders / Y. Feng, Z. Xue, B. Zhang [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 70. – 106387. – DOI:10.1016/j.jobbe.2023.106387
25. A novel binder prepared from municipal solid waste incineration fly ash and phosphogypsum / S. Wang, C. Xue, Q. Zhao [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 71. – 106486. – DOI:10.1016/j.jobbe.2023.106486
26. Shrinkage mitigation of alkali-activated fly ash/slag mortar by using phosphogypsum waste / Y. Zheng, D. Xuan, B. Shen [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 375. – 130978. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130978
27. Investigation on properties and mechanism of non-calcined Bayer red mud-phosphogypsum cementitious binder / J. Xu, F. Xu, Y. Wu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 379, Part 1. – 134661. – DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134661.
28. Alkali Activated Paste and Concrete Based on of Biomass Bottom Ash with Phosphogypsum / D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė, A. Kantautas [et al.] // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – 5190. – DOI:10.3390/app10155190
29. Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate-activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbelsa, Y. Pontikesb, P. Samync [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2020. – Vol. 132. – 1060. – DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106054
30. Hamdi, N. Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes / N. Hamdi, I.B. Messaoud, E. Srasra // *Comptes Rendus Chimie*. – 2019. – Vol. 22 (2–3). – P. 220–226. DOI:10.1016/j.crci.2018.11.010.
31. Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbels, R.I. Iacobescu, Y. Pontikes [et al.] // *Construction and*

Building Materials. – 2019. – Vol. 215. – P. 371–380. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.194

32. Influence of cement on properties of calcined phosphogypsum based composite cementitious materials / F. Deng, J. Ye, Y. Liu [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 24. – P. 3145–3156. – DOI:10.1016/j.jmrt.2023.03.194.

33. Utilization of tricalcium aluminate as modifier on phosphogypsum-based full solid-waste cementitious material / P. Chen, B. Ma, H. Tan [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 377. – 131034. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131034.

34. Improving the mechanical property and water resistance of β -hemihydrate phosphogypsum by incorporating ground blast-furnace slag and steel slag / P. Chen, B. Ma, H. Tan [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 344. – 128265. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128265.

35. Hydration mechanism and thermodynamic simulation of ecological ternary cements containing phosphogypsum / J. Hou, X. He, X. Ni [et al.] // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 33. – 104621. – DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.104621

36. Mechanical strength, water resistance and drying shrinkage of lightweight hemihydrate phosphogypsum-cement composite with ground granulated blast furnace slag and recycled waste glass / L. Zhang, K.H. Mo, S.P. Yap [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 345. – 128232. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128232.

37. Bagdasarov, A.S. The use of industrial waste for the production of slag-lime-gypsum binder / A.S. Bagdasarov, A.I. Nesterenko // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No. 3 (63). – P. 35.

38. Production of gypsum puzzolanic binder with increased water resistance / A.V. Strakhov, Yu.G. Ivashchenko, S.A. Evstigneev [et al.] // Technical regulation in transport construction. – 2016. – No. 2(16). URL: trts.esrae.ru/ru/31-160 (date of access: 08/09/2023).

39. Kapyushina, A.G. Designing the composition of a composite non-firing binder based on technogenic wastes of the Cherepovets industrial hub and researching its technical characteristics / A.G. Kapyushina, G.V. Bondarenko // Chemical industry today. – 2011. – No. 11. – P. 37–41

40. Sulfate-slag binders of increased strength and durability / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, A.V. Mironenko [et al.] // Dry building mixes. – 2011. – No. 3. – P. 36–38.

41. Garg, M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders / M. Garg, N. Jain, M. Singh // Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23(10). – P. 3138–3143. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.

42. Huang, Y. Investigation on phosphogypsum-steel slag-granulated blast-furnace slag-limestone cement / Y. Huang, Z.S. Lin // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24(7). – P. 1296–1301. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.006.

43. Valorization of phosphogypsum as hydraulic binder / T. Kuryatnyk, C.A. da Luz, J. Ambroise [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 160(2–3). – P. 681–687. – DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.03.014.

44. Min, Y. Activation of fly ash–lime systems using calcined phosphogypsum / Y. Min, Q. Jueshi, P. Ying // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22(5). – P. 1004–1008. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.005.

45. Wu, Q. Research status of super sulfate cement / Q. Wu, Q. Xue, Z. Yu // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 294. – 126228. – DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126228.

46. Liu, S. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement / S. Liu, J. Ouyang, J. Ren // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 24320. – 118226. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118226

47. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate / S.R. Pinto, da Luz C.A., G.S. Munhoz [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2020. – Vol. 36. – 106172. – DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106172.

48. Liu, S. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement / S. Liu, P. Fang, J. Ren [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 272. – 122660. – DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122660.
49. Liu, S. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement / S. Liu, L. Wang, B. Yu // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 21430. – P. 9–16. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052
50. Pinto, S.R. Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress / S.R. Pinto, C.A. da Luz, G.S. Munhoz [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 263. – 120640. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120640.
51. Evaluation of mechanical properties and abrasion resistance of PAN fiber-reinforced sulfoaluminate cement composites / J. Wang, R. Zhang, L. Lu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – e01973. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e01973
52. Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterization / V. Isteri, K. Ohenoja, T. Hanein [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2022. – Vol. 154. – 106715. – DOI:10.1016/j.cemconres.2022.106715
53. Serpichev, A.S. The use of technogenic waste in the production of belite-sulfoaluminate cement / A.S. Serpichev, L.I. Sycheva // *Successes in chemistry and chemical technology*. – 2022. – Vol. 36, No. 3. – P. 130–133.
54. Li, Z. Using alumina-rich sludge and phosphogypsum manufactures low-CO₂ cement / Z. Li, L. Huang, S. Wang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 288. – 123016. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123016.
55. Sotnikova, E.T. Cements based on sulfated clinkers / E.T. Sotnikova, D.D. Danilovich, E.N. Potapova // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2021. – Vol. 35, No. 14 (249). – P. 19–21.
56. Myasnikov, A.K. Synthesis of sulfoaluminate cement and study of its properties / A.K. Myasnikov, L.I. Sycheva // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2021. – Vol. 35, No. 4 (239). – P. 70–72.
57. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects / S. Wu, X. Yao, C. Ren [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 271. – 110986. – DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110986.
58. Co-preparation of calcium sulfoaluminate cement and sulfuric acid through mass utilization of industrial by-product gypsum / S. Wu, Y. Yao, X. Yao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. 121801. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121801.
59. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P₂O₅ and F on the clinker formation and cement performances / Y. Huang, J. Qian, X. Kang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 203. – P. 432–442. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.112
60. Ivashina, M.A. The use of industrial waste in the technology of sulfoaluminate clinker / M.A. Ivashina, Yu.R. Krivoborodov // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2017. – Vol. 31. – No. 1. – P. 22–24.
61. Synthesis of belite sulfoaluminate-ternesite cements with phosphogypsum / Y. Shen, J. Qian, Y. Huang [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 63. – P. 67–75. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2015.09.003.

УДК 691.4

DOI 10.54734/20722958_2024_2_47

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Карпова Ольга Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: olga_viktorovna_60@mai.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

Karpova Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Quality Management and
Construction Technologies»
E-mail: olga_viktorovna_60@mai.ru

КИНЕТИКА СТАРЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КАЧЕСТВА ИХ ВНЕШНЕГО ВИДА

В.И. Логанина, О.В. Карпова

Приведены результаты исследования закономерности старения лакокрасочных покрытий в зависимости от качества их внешнего вида. Установлено, что покрытия, обладающее большим числовым значением первоначального уровня дефектности, характеризуются более ранним разрушением. Приведены значения константы скорости накопления дефектов в зависимости от первоначального уровня дефектности покрытия.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, покрытия, дефекты, старение, константа скорости старения

PAINT COATINGS AGING KINETICS DEPENDING ON THEIR APPEARANCE QUALITY

V.I. Loganina, O.V. Karpova

The authors present the patterns of aging of paint coatings depending on the quality of their appearance. It has been established that coatings with a large numerical value of the initial level of defectiveness are characterized by earlier destruction. The values of the defect accumulation rate constant are given depending on the initial level of the coating defectiveness.

Keywords: paints and varnishes, coatings, defects, aging, aging rate constant

Введение

Широкое применение для отделки фасадов зданий находят лакокрасочные материалы, сухие строительные смеси [1–3]. В процессе эксплуатации при воздействии климатических факторов происходит изменение свойств покрытий, приводящее в итоге к их разрушению. Для описания изменения свойств покрытий в процессе старения в настоящее время существуют различные модели [4–7]. В соответствии со статистической теорией прочности твердых тел вероятность разрушения покрытий определяется наличием и концентрацией дефектов, в том числе и на поверхности покрытий. Таким образом, качество внешнего вида покрытий в числе других факторов определяет стойкость покрытий к разрушению.

В процессе эксплуатации происходит изменение декоративных, а затем и защитных свойств покрытий [6–11]. Первые признаки старения пленок – потеря блеска, изменение цвета, снижение адгезии и меление.

Представляет интерес применение наследственной теории для описания изменения качества внешнего вида в процессе воздействия внешней среды. В работах [12–14] приведены результаты оценки изменения свойств покрытий, проведенной на основе наследственной теории старения. Авторами установлено значение наследственной составляющей для различных видов покрытий и времени их старения.

Процесс старения покрытий является многоуровневым. Разрушению предшествует этап накопления повреждений (разрыв отдельных химических связей, возникновение субмикро- и микроскопических трещин, образование магистральной трещины). Уровень накопления повреждений в момент t кинетического процесса старения покрытий можно оценить показателем [15]

$$\omega = \frac{H(t)}{H_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где $H(t)$ – текущее состояние покрытия; $H_{\text{кр}}$ – полная потеря покрытием эксплуатационных свойств.

В момент разрушения $\omega = 1$.

Распределение повреждений по времени – неравномерное и обуславливается композиционной неоднородностью, гетерогенностью структуры покрытия (неравномерность напряженного состояния).

Изменения структуры покрытия в процессе старения происходят с различной скоростью накопления повреждений. Интенсивность разрушения под воздействием климатических факторов неодинакова на разных этапах эксплуатации.

Кинетический процесс накопления повреждений в первом приближении описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = k(1 - \omega), \quad (2)$$

где $k = \text{const}$.

Константа скорости накопления дефектов определяется в соответствии с выражением (2) по формуле

$$k = \frac{\ln \frac{1 - \omega_0}{1 - \omega_t}}{t}. \quad (3)$$

Нами было исследовано влияние первоначального уровня дефектов на кинетику разрушения покрытия.

Материалы и методы исследования

В качестве красочного состава применяли алкидную эмаль ПФ-115, масляную краску МА-15, нитроцеллюлозную краску НЦ-123. Красочные составы наносились на подложки из цементно-песчаного раствора кистью. Различное качество внешнего вида покрытий создавалось изменением пористости подложки и реологических свойств красочных составов. После отверждения образцы с покрытием были испытаны на попеременное замораживание-оттаивание. В процессе испытания определялось количество дефектов на поверхности покрытия: изменение цвета, изменение блеска, меление, грязеудержание, волнистость, включения, потёки, штрихи, риски, разнооттечность, выветривание, растрескивание, отслаивание, растворение, сморщивание, образование пузырей. Количество дефектов определялось на площади покрытия, составляющей 64 см^2 . В соответствии с формулой (1) определяли уровень дефектности покрытия.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований приведены в таблице.

Выявлено, что в процессе циклического замораживания-оттаивания трещины образуются около дефектов на поверхности покрытия. В частности, через 5 циклов испытаний на поверхности покрытия на основе краски МА-15, характеризующейся показателем шероховатости $R_a=0,23$ мкм, появились поверхностные трещины, видимые невооруженным глазом, а на покрытии с показателем шероховатости $R_a=0,14$ мкм – через 15 циклов испытаний. Аналогичные закономерности характерны и для других покрытий.

Уровень накопления повреждений покрытий в зависимости от качества их внешнего вида в процессе замораживания-оттаивания

Наименование красочного состава	Кол-во циклов	Уровень дефектности ω	Шероховатость поверхности, R_a , мкм	Константа скорости разрушения k , циклы ⁻¹
Алкидная эмаль ПФ-115	0	0,61	0,12 (1 вариант)	$k_1=0,0459$
		0,49	0,10 (2 вариант)	$k_2=0,0347$
		0,315	0,08 (3 вариант)	$k_3=0,0201$
	5	0,69	0,47 (1 вариант)	
		0,57	0,36 (2 вариант)	
		0,43	0,23 (3 вариант)	
	10	1,0 отслаивание	- (1 вариант)	
		0,64	2,58 (2 вариант)	
		0,44	2,21 (3 вариант)	
	15	1,0 отслаивание	- (1 вариант)	
		1,0 отслаивание	- (2 вариант)	
		1,0 отслаивание	- (3 вариант)	
Масляная краска МА-15	0	0,59	0,23 (1 вариант)	$k_1=0,0252$
		0,51	0,18 (2 вариант)	$k_2=0,01952$
		0,384	0,14 (3 вариант)	$k_3=0,0156$
	5	0,65	0,63 (1 вариант)	
		0,59	0,59 (2 вариант)	
		0,576	0,40 (3 вариант)	
	10	1,0 отслаивание	- (1 вариант)	
		0,67	1,69 (2 вариант)	
		0,64	1,46 (3 вариант)	
	15	-	- (1 вариант)	
		1,0 отслаивание	- (2 вариант)	
		1,0 отслаивание	- (3 вариант)	
Нитроцеллюлозная НЦ-123	0	0,43	0,19 (1 вариант)	$k_1=0,0517$
		0,31	0,17 (2 вариант)	$k_2=0,0302$
		0,285	0,14 (3 вариант)	$k_3=0,0139$
	5	0,56	0,52 (1 вариант)	
		0,38	0,48 (2 вариант)	
		0,31	0,16 (3 вариант)	
	10	1,0 растрескивание	- (1 вариант)	
		0,49	2,78 (2 вариант)	
		0,38	2,32 (3 вариант)	
	15	-	- (1 вариант)	
		1,0 растрескивание	- (2 вариант)	
		1,0 растрескивание	2,65 (3 вариант)	

Выявлено, что независимо от вида покрытия и коррозионного воздействия среды наблюдается увеличение показателей шероховатости поверхности и уровня дефект-

ности покрытия. Анализ данных свидетельствует, что покрытия, обладающее большим числовым значением первоначального уровня дефектности, характеризуются более ранним разрушением. Покрытие на основе масляной краски МА-15 с первоначальным уровнем дефектности $\omega_0=0,59$ разрушаются после 10 циклов замораживания-оттаивания, а покрытия с $\omega_0=0,384$ – после 15 циклов замораживания-оттаивания.

Независимо от вида покрытия и коррозионного воздействия среды наблюдается увеличение показателей шероховатости поверхности и уровня дефектности покрытия. Результаты расчета свидетельствуют, что при увеличении шероховатости поверхности покрытия наблюдается увеличение константы скорости накопления дефектов. Так, при шероховатости поверхности покрытия на основе краски ПФ-115 $R_a = 0,12$ мкм константа скорости накопления дефектов составляет $k = 0,0459$ цикла⁻¹, а при шероховатости $R_a = 0,08$ мкм $k = 0,0201$ цикла⁻¹. Аналогичные закономерности характерны и для других видов покрытий.

Результаты, приведенные в таблице, свидетельствуют, что характер разрушения покрытий в процессе коррозионного воздействия среды неодинаков. Так, для покрытий на основе масляной и алкидной красок характерно отслаивание, а для покрытий на основе нитроцеллюлозной краски – растрескивание.

Выводы

Выявлен механизм разрушения лакокрасочных покрытий в процессе старения. Установлено, что увеличение шероховатости поверхности покрытий, способствующее увеличению первоначального уровня дефектности их внешнего вида, приводит к увеличению числовых значений константы скорости накопления дефектов.

Список литературы

1. Яковлев, А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий / А.Д. Яковлев. – СПб.: Химиздат, 2008. – 448 с.
2. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы на основе золь-гель технологии / В.И. Логанина, О.А. Давыдова // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 50–51.
3. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
4. Сухарева, Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Л.А. Сухарева. – М: Химия, 1984. – 240 с.
5. Зубов, П.И. Исследование долговечности полимерных покрытий в зависимости от условий формирования и старения / П.И. Зубов, В.С. Голикова, Л.А. Сухарева // Докл. АН СССР, 161:4 (1965). – С. 864–866.
6. Андреева, Н.П. Влияние климатических факторов на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий, предназначенных для защиты внешней поверхности самолетов / Н.П. Андреева, Т.А. Новикова, Л.В. Семенова, Е.В. Николаев // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2014. – №10. – С. 32–35.
7. Андреева, Н.П. Влияние климатических факторов тропического и умеренного климата на свойства лакокрасочных покрытий на уретановой основе / Н.П. Андреева, М.Р. Павлов, Е.В. Николаев, А.В. Славин // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2018. – №4. – С. 24–28.
8. Loganina, V.I. Statistical quality assurance of the appearance of paint coatings / V.I. Loganina // Materials Today: Proceedings. 1. Сер. «International Conference and Exposition on Mechanical, Material and Manufacturing Technology, ICE3MT 2020». – 2020. – P. 2099–2101.
9. Логанина, В.И. Оценка кинетики старения покрытий цементных бетонов / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1996. – № 1. – С. 57.

10. Карякина, М.И. Физико-химические основы образования и старения покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
11. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 351 с.
12. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
13. Логанина, В.И. Учет наследственного фактора при оценке старения защитно-декоративных покрытий наружных стен зданий / В.И. Логанина, Л.П. Орентлихер, А.М. Данилов, Е.И. Куимова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 1. – С. 43.
14. Орентлихер, Л.П. О роли наследственного фактора в формировании и кинетике изменения свойств защитно-декоративных покрытий наружных стен зданий / Л.П. Орентлихер, В.И. Логанина, А.М. Данилов, Е.И. Куимова // Пластические массы. – 2002. – № 4. – С. 23.
15. Логанина, В.И. Статистические методы контроля и управления качеством продукции / В.И. Логанина, А.А. Федосеев. – Ростов-на-Дону, 2007.

References

1. Yakovlev, A.D. Chemistry and technology of paint and varnish coatings / A.D. Yakovlev. – SPb.: Himizdat, 2008. – 448 p.
2. Loganina, V.I. Lime finishing compositions based on sol-gel technology / V.I. Loganina, O.A. Davydova // Building materials. – 2009. – No. 3. – P. 50–51.
3. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
4. Sukhareva, L.A. Durability of polymer coatings / L.A. Sukhareva. – M.: Chemistry, 1984. – 240 p.
5. Zubov, P.I. Study of the durability of polymer coatings depending on the conditions of formation and aging / P.I. Zubov, V.S. Golikova, L.A. Sukhareva // Dokl. AN SSSR, 161:4 (1965). – P. 864–866.
6. Andreeva, N.P. Influence of climatic factors on operational properties coatings designed to protect the outer surface of aircraft / N.P. Andreeva, T.A. Novikova, L.V. Semenova, E.V. Nikolaev // Paints and varnishes and their application. – 2014. – No. 10. – P. 32–35.
7. Andreeva, N.P. Influence of climatic factors of tropical and temperate climate on the properties of urethane-based paint coatings / N.P. Andreeva, M.R. Pavlov, E.V. Nikolaev, A.V. Slavin // Paints and varnishes and their application. – 2018. – No. 4. – P. 24–28.
8. Loganina, V.I. Statistical quality assurance of the appearance of paint coatings / V.I. Loganina // Materials Today: Proceedings. 1. Ser. «International Conference and Exposition on Mechanical, Material and Manufacturing Technology, ICE3MT 2020». – 2020. – P. 2099–2101.
9. Loganina, V.I. Evaluation of the aging kinetics of cement concrete coatings / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 1996. – No. 1. – P. 57.
10. Karyakina, M.I. Physical and chemical bases of formation and aging of coatings / M.I. Karyakina. – M.: Chemistry, 1980. – 216 p.
11. Zimon, A.D. Adhesion of films and coatings / A.D. Zimon. – M.: Chemistry, 1977. – 351 p.
12. Rabotnov, Yu.N. Elements of hereditary mechanics of solids / Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1977. – 384 p.
13. Loganina, V.I. Accounting for the hereditary factor in assessing the aging of protective and decorative coatings of the outer walls of buildings / V.I. Loganina, L.P. Orentlicher, A.M. Danilov, E.I. Kuimova // News of higher educational institutions. Construction. – 2002. – No. 1. – P. 43.

14. Orentlicher, L.P. On the role of the hereditary factor in the formation and kinetics of changes in the properties of protective and decorative coatings of the outer walls of buildings / L.P. Orentlicher, V.I. Loganina, A.M. Danilov, E.I. Kuimova // Plastic masses. – 2002. – No. 4. – P. 23.

15. Loganina, V.I. Statistical methods of control and management of product quality / V.I. Loganina, A.A. Fedoseev. – Rostov-on-Don, 2007.

УДК 691.31

DOI 10.54734/20722958_2024_2_53

*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

Романенко Игорь Иванович,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Механизация
и автоматизация производства»
E-mail: miap@pguas.ru

Фадин Алексей Ильич,
аспирант
E-mail: miap@pguas.ru

Петровнина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механизация
и автоматизация производства»
E-mail: irisha-vas@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

Romanenko Igor Ivanovich,
Candidate of Sciences,
Head of the Department «Mechanization
and Automation of Production»
E-mail: miap@pguas.ru

Fadin Aleksey Ilyich,
Graduate student
E-mail: miap@pguas.ru

Petrovnina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Mechanization and
Automation of Production»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

РЕСУРСООРИЕНТИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА

И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина

Рассмотрена технология получения бетонов для гиперпрессования на основе сталеплавленного шлака за счет ускоренной карбонизации и формирования комплексной бетонной матрицы. Выявлено влияние следующих факторов на физико-механические свойства бетона: дисперсность сталеплавленного шлака, влажность формовочной смеси, концентрация углекислого газа, температура среды в барокамере, продолжительности процесса карбонизации в барокамере. Установлено, что после 24 часов твердения в условиях газовой среды из CO_2 образуется прочный камень с морозостойкостью F_{200} .

Отмечено, что изучение свойств и модификации шлаков в различных условиях требует комплексного подхода, включающего рентгенофазовый и электронно-микроскопический. Разработаны рекомендации по технологическому регламенту получения мелкозернистых строительных блоков на основе сталеплавленного шлака.

Ключевые слова: отходы, строительные материалы, сталеплавленные шлаки, технологические факторы, бетон, прочность, морозостойкость

RESOURCE-BASED TECHNOLOGY FOR PRODUCING CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON STEELMAKING SLAG

I.I. Romanenko, A.I. Fadin, I.N. Petrovnina

The production of concrete for hyperpressing based on steelmaking slag due to accelerated carbonization and formation of a complex concrete matrix is considered. The influence of the following factors on the physical and mechanical properties of concrete has been revealed: dispersion of steel slag, humidity of the molding mixture, concentration of carbon dioxide, temperature of the environment in the pressure chamber, duration of the carbonization process in the pressure chamber. It has been established that after 24 hours of hardening in a gas environment, a durable stone with frost resistance F_{200} is formed from CO_2 .

The study of the properties and modification of slags under various conditions requires an integrated approach, including X-ray diffraction and electron microscopy. Recommendations for technological regulations for the production of small-sized building blocks based on steel-smelting slag have been developed.

Keywords: waste, building materials, steel slag, technological factors, concrete, strength, frost resistance

Введение. Актуальным вопросом является разработка эффективной технологии использования сталеплавильного шлака в качестве ресурсного потенциала при производстве строительных материалов. В то же время применение сталеплавильного шлака (СПШ) в различных отраслях народного хозяйства не превышает 20 % [1].

Причины ограниченного применения сталеплавильного шлака – нестабильность химического и минералогического состава СПШ, склонность к саморазрушению из-за неравномерной деформации при взаимодействии с водой и слабое проявление гидравлических свойств минералами шлака. Существенным фактором, негативно влияющим на окружающую среду, является газообразный отход металлургического производства – CO_2 . Требуется в кратчайшие сроки внедрить инновационные технологии, ориентированные на максимальное снижение выбросов углекислого газа в атмосферу и превращение шлаков в ценный ресурс для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью [2, 3].

Вторичная переработка побочных продуктов металлургического производства обеспечивает сохранение природных ресурсов, сокращение объемов накопления твердых промышленных отходов, дает возможность извлечения ценных металлов.

Исследованиями установлено, что в результате карбонизации некоторых минералов происходит связывание CO_2 в твердые и нерастворимые соединения [4–6]. Карбонизация – это механизм отверждения газообразным диоксидом углерода CO_2 в водных условиях кальцийсодержащих соединений. Таким образом, возможно получение бетонной смеси из сталеплавильного шлака и газообразного диоксида углерода.

Сталеплавильные шлаки характеризуются повышенным содержанием CaO и MgO , что является решающим фактором, ограничивающим его использование совместно с портландцементом в бетонных смесях. Ряд ученых [7, 8] предложили произвести карбонизацию как мелкого, так и крупного заполнителя на основе сталеплавильных шлаков в барокамере, а затем испытать на прочность бетоны с карбонизированным шлаком. Физико-механические свойства бетонов с карбонизированным стальным шлаком показали более высокую прочность на ранней стадии твердения, чем бетоны на доломитовом заполнителе. Превышение прочности на 3-и и 28-е сутки относительно контрольного образца составило 85 % и 18 % соответственно [3–5]. Карбонизированный заполнитель является источником центров гидратации, что подтверждено в исследованиях [6–8].

Прочность на сжатие монолитного бетона на основе портландцемента с заполнителями из карбонизированного сталеплавильного шлака при твердении в нормальных условиях превышала в 28-суточном возрасте прочность контрольного состава на 15–20 %; при этом бетон имел более короткое время схватывания и более высокую раннюю прочность [8, 9]. В то же время прошедшие термообработку образцы бетона имели меньшую прочность на сжатие, чем контрольные, на 10–15 % в возрасте 28 суток при твердении в камере нормального твердения.

Можно сделать вывод, что ускоренная карбонизация может быть использована для производства строительных конструкций на основе карбонизированного сталеплавильного шлака при одновременной утилизации CO_2 .

Были попытки получить из сталеплавильного шлака гидравлическое вяжущее, однако шлак самостоятельно проявляет слабые гидравлические свойства из-за отсутствия в его составе трёхпальцевого силиката и аморфного SiO_2 [1, 3, 5]. После измельчения в шаровой мельнице до удельной поверхности 3500–3700 $\text{см}^2/\text{г}$ контрольные образцы бетона на основе СПШ показали невысокую прочность на сжатие [2].

Ранее было выявлено, что тонкомолотое вяжущее на основе сталеплавильных шлаков с высоким содержанием свободного MgO/CaO вызывает чрезмерное расширение, приводящее к нестабильности объема бетонов и образованию трещин с течением времени [8].

Высокое содержание свободного MgO/CaO в стальном шлаке позволило исследователям [3, 5] разработать технологию получения вяжущего на основе карбонизированного СПШ. Шлаковая паста на основе сталеплавильного шлака, прошедшая вибропрессование, твердела в барокамере в среде углекислого газа. Прочность на

сжатие отформованных образцов в зависимости от срока наблюдения составляла 75–80 МПа. Это вызвано уплотнением микроструктуры матрицы вяжущего и образованием в контактной части на частицах шлака кальцита (CaCO_3).

Однако до сих пор было проведено очень ограниченное количество исследований по получению малоразмерных строительных материалов на основе немолотого сталеплавильного шлака, прошедшего твердение в среде CO_2 .

Целью исследования является получение гиперпрессовых малоразмерных строительных материалов методом ускоренной карбонизации при полной замене вяжущего и заполнителей сталеплавильным шлаком.

Это исследование может дать толчок к производству сталешлакобетонов с высоким уровнем использования вторичных материалов (сталеплавильные шлаки и углекислый газ), а также интегрировать производство строительных материалов в единую цепочку строительной индустрии. Инновационная технология позволит минимизировать экологический ущерб за счет массового использования промышленных отходов и будет являться значимой научно-практической разработкой.

Материалы и методики проведения исследований

Мелкий заполнитель бетонной смеси – сталеплавильный шлак с модулем крупности $M_{кр} = 1,6–1,8$. Крупный заполнитель – сталеплавильный шлак фракции 5–10 мм от дробления исходной фракции 20–40 мм. Выдержка в отвале 18–36 месяцев. Воздушная среда карбонизации – 99,0 % CO_2 . Вяжущего нет. Соотношение мелкого и крупного заполнителей – 1:2 соответственно.

Сталеплавильный шлак Новолипецкого металлургического комбината отбирали на площадке хранения в отвале из 4 точек по 40 кг. Пробы смешивались и производился затем рассев на виброситах с отделением для дальнейших исследований фракции 0–5 мм (песок) и фракции 5–10 мм (крупный заполнитель).

Химический состав шлаков исследовали с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford instruments INCA x-act 51-ADD0007 в составе электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH. Минералогический состав определяли с помощью рентгеновской дифракции (Philips X'Expert), оснащенной рентгеновской трубкой с медным анодом, работающей при 40 кВ и 35 мА и использующей автоматическую расходящуюся щель. Образцы сканировали под углом от 2 до 120° (2θ) с шагом $0,04^\circ$ и временем выдержки 4 с на шаг. Анализ Ритвельда проводили с использованием программного обеспечения HighScore Plus. Для определения содержания аморфной фазы использовался внешний стандарт кремния.

Химический состав исследуемых шлаков представлены в табл.1. Содержание CaO – более 45 %, MgO – около 9,6 %, щелочность – $\text{pH} > 12$. Максимальная теоретическая способность шлака связать углекислый газ при оптимальных условиях карбонизации составляет ~ 440–460 г $\text{CO}_2/\text{кг}$ сталеплавильного шлака [2].

Т а б л и ц а 1

Химический состав исследуемых сталеплавильных шлаков

№ партии шлака	Масс, %						
	CaO	MgO	Fe_2O_3	MnO	Al_2O_3	SO_2	SiO_2
1	42,3	6,8	2,9	4,4	2,2	10	16,5
2	45,0	9,4	1,7	1,4	3,3	28	12,0
3	61,1	7,4	6,7	7,4	4,4	0,8	14,1

Для дальнейших исследований используем пробу №3 (см. табл. 1), т.к. по статистическим выкладкам и контролю за составами сталеплавильного шлака было установлено, что данный состав является усредненным при обработке результатов за 3 года.

Процесс карбонизации в лабораторной вакуум-барокамере состоит из трех этапов: 1 – предварительная подготовка шлаков и создание формовочной смеси заданной влажности с последующей гомогенизацией частиц шлака, влажность шлаковой смеси 10 %; 2 – формование строительных блоков путем гидравлического гиперпрессования в съемных формах при давлении прессования 200 кг/см^2 ; 3 – ускоренная карбонизация

отформованных блоков в вакуум-барокамере в среде CO_2 . В камере создается вакуум 0,06 МПа в течение 15 мин, и затем на протяжении 24 часов при давлении исходного газа 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 МПа и температуре 120 °С проводится ускоренная карбонизация сталеплавильного шлака.

Концентрация CO_2 в подаваемом газе составляет 100 %. Давление в вакуум барокамере поддерживалось постоянными за счет автоматического пополнения израсходованного газа CO_2 новой порцией.

Технические свойства карбонизированных блоков (250 мм × 120 мм × 65 мм) протестированы в сертифицированной лаборатории с использованием стандартных процедур ГОСТ, разработанных для испытаний бетонных тротуарных блоков на прочность при сжатии, морозостойкости и водопоглощения.

Результаты и обсуждение

Исследован химический и фазово-минералогический составы СПШ. Химический состав показал, что основа состава шлака – это CaO (61,1 масс %) и SiO_2 (14,1 масс %). По результатам рентгенофазового анализа (рис. 1) видно присутствие периклаза, а также большого количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образовавшегося из свободного CaO в результате гидратации при хранении шлака в отвале на воздухе.

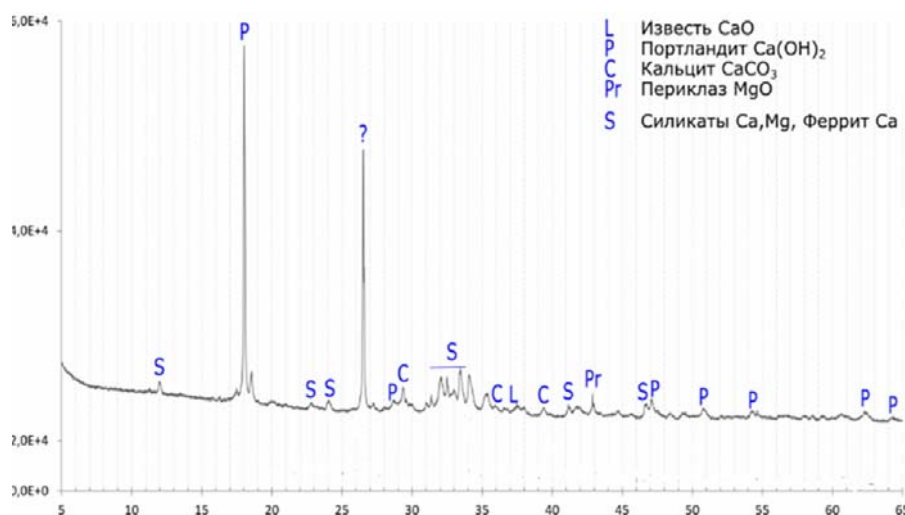


Рис. 1. Рентгенофазовый состав сталеплавильного шлака

Целью процесса карбонизации в данном исследовании является получение строительных материалов с использованием стальных шлаков и CO_2 в качестве сырья без добавления гидравлических или пуццолановых связующих. Прочность достигается за счет осаждения карбонатных минералов, которые связывают частицы шлака вместе и заполняют пористость между ними.

Для этого в эксперименте варьировались величина выдержки образцов в камере карбонизации и давление газа CO_2 (табл. 2).

Анализируя данные табл. 2, можно сделать вывод, что оптимальное время ускоренной карбонизации сталеплавильного шлака составляет 24 часа при давлении углекислого газа в камере 1,2 МПа. Прочность на сжатие образцов составляет 32,57 МПа, трещин по поверхности нет.

Водопоглощение колеблется от 6,1 % до 14,1 %, а морозостойкость F_2 соответствует 150–200 циклам попеременного замораживания оттаивания. Оптимальными технологическими параметрами получения мелкогабаритных блоков на сталеплавильных шлаках являются: время ускоренной карбонизации – 24 часа; давление в вакуум-барокамере CO_2 – 1,2 МПа; температура среды в камере карбонизации – 120 °С. Для облегчения проникновения и диффузии CO_2 в бетонные образцы CO_2 подается с высокой концентрацией 99,9 % и давлением 0,3–1,2 МПа.

Влияние технологических факторов на прочность образцов из сталеплавильного шлака после карбонизации

Технологические операции	Составы											
	1			2			3			4		
	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	4,3
Время карбонизации образцов 24 час												
Давление в вакуум барокамере CO ₂ , МПа	0,3			0,6			0,9			1,2		
Предел прочности при сжатии, МПа	16,0	15,5	16,7	21,2	20,7	23,9	31,9	29,3	28,2	30,2	33,9	33,6
Среднее значение предела прочности на сжатие, МПа	16,1			21,9			29,8			32,6		
Водопоглощение, %	11,0			9,8			6,4			6,8		
Морозостойкость F ₂ (цикл)	150			200			200			200		
Давление газа CO ₂ в камере карбонизации 1,2 МПа												
Время карбонизации, час	5,0			10,0			24,0			48		
Предел прочности при сжатии, МПа	15,7	18,9	17,3	25,6	23,7	28,2	30,2	33,9	33,6	29,8	35,7	34,4
Среднее значение предела прочности на сжатие, МПа	17,3			25,83			32,57			33,3		
Водопоглощение, %	14,1			7,5			6,7			6,3		
Морозостойкость F ₂ (цикл)	150			200			200			200		

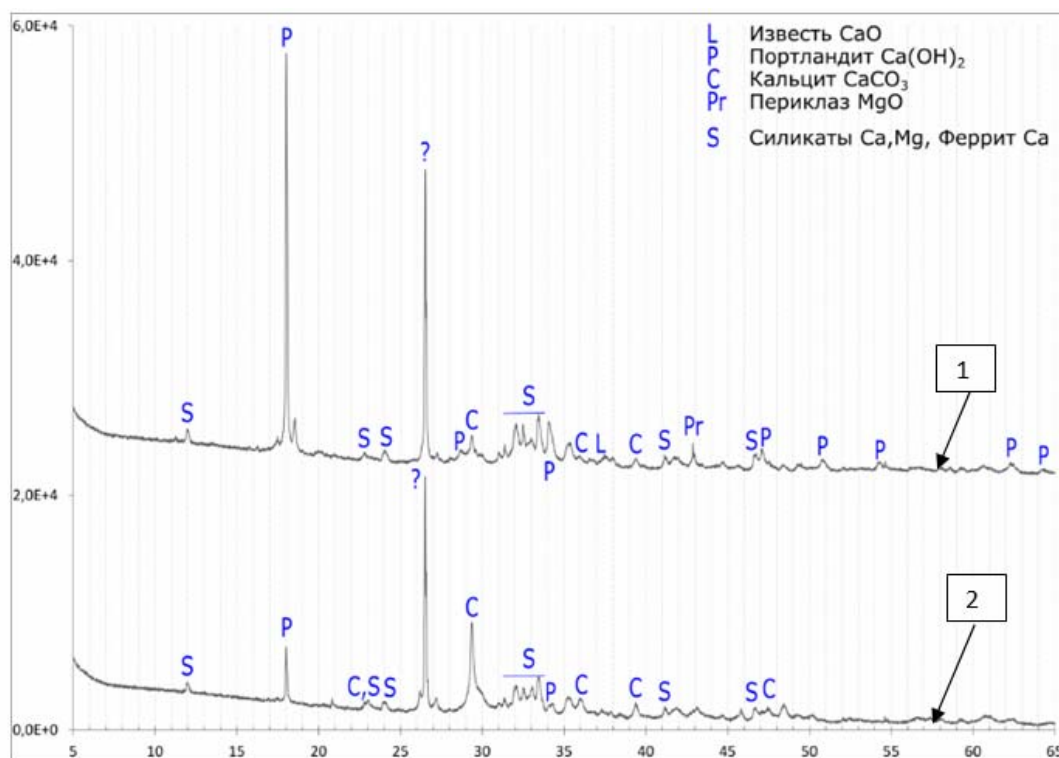


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов:

1 – образец до карбонизации; 2 – образец шлака после ускоренной карбонизации в течение 24 часов при давлении углекислого газа в камере карбонизации 1,2 МПа

На рис. 2 представлены рентгеновские дифрактограммы сталеплавильного шлака до и после проведения ускоренной карбонизации в вакуум-барокамере. В дифрактограмме образца 2 (см. рис. 2) интенсивность рефлекса $\text{Ca}(\text{OH})_2$ существенно снижается по отношению к образцу 1 (см. рис. 1–2) одновременно с увеличением интенсивности CaCO_3 . Рефлексы свободного CaO и периклаза пропадают полностью. Это говорит о полном прохождении ускоренной карбонизации сталеплавильного шлака в процессе технологической обработки образца.

Интенсивный рефлекс в области $26.5^\circ 2\theta$, присутствующий в дифрактограммах образцов 1 и 2, принадлежит инертной фазе, которую идентифицируют по каталогам как кварц. При рассмотрении срезов образца, прошедшего карбонизацию, видно, что сцементированный материал образует однородную матрицу и состоит из зерен шлака и продуктов его гидратации и карбонизации.

Выводы

1. Разработан технологический процесс ускоренной карбонизации сталеплавильных шлаков для производства гиперпрессовых мелкозернистых строительных материалов с использованием шлаков и углекислого газа в качестве сырья без дополнительного применения других видов вяжущих.
2. Давление газа CO_2 в вакуум барокамере 1,2 МПа является оптимальным для проведения ускоренной реакции карбонизации сталеплавильного шлака и получения максимальной прочности контрольных образцов (32,6 МПа).
3. Установлено оптимальное значение времени карбонизации СПШ – 24 часа при давлении газа CO_2 1,2 МПа и температуре 120°C .
4. Предложенная технология карбонизации сталеплавильного шлака позволяет получать мелкозернистые элементы для дорожного строительства с высокими эксплуатационными свойствами: водопоглощение – 14,1–6,3 %; морозостойкость F_2 – 150–200 циклов.

Список литературы

1. Рузавин, А.А. Утилизация сталеплавильных шлаков путем ускоренной карбонизации / А.А. Рузавин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 68–72. – DOI: 10.14529/build180310
2. Орешкин, Д.В. Экологические проблемы комплексного освоения недр при масштабной утилизации техногенных минеральных ресурсов и отходов в производстве строительных материалов / Д.В. Орешкин // Строительные материалы. – 2017. – № 8. – С. 55–63.
3. Riding, K.A. Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking / K.A. Riding, J.L. Poole, A.K. Schindler, M.C.G. Juenger, K.J. Folliard // ACI Materials Journal. – 2008. – 105(2). – P. 149–155.
4. Yixin, Shao. Carbon Dioxide – Activated Steel Slag for Slag-Bonded Wallboard Application / Yixin Shao, Ahmed El-Baghdadi, Zhen He, Alfonso Mucci, Benoit Fournier // Journal of Materials in Civil Engineering. – March 2015. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001055
5. Anastasiou, E. Utilization of fine recycled aggregate in concrete with fly ash and steel slag / E. Anastasiou, F.K. Georgiadis, M. Stefanidou // Constr. Build. Mater. – 2014. – 50. – P. 154–161.
6. Романенко, И.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака / И.И. Романенко, А.И. Фадин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 85–93.
7. Latawiec, R. Sustainable concrete performance – CO_2 -emission / R. Latawiec, P. Woyciechowski, K. J. Kowalski // Environments. – 2018. – Vol. 5, № 2. – P. 27–41.
8. Wang, I. Assessment of carbon dioxide absorption by slag mixture of concrete structures taking into account the carbonization effect / I. Wang // Sustainability. – 2016. – Vol. 8, no. 4. – P. 312–330.

9. Feng, C. Energy efficiency in China's iron and steel industry: Evidence and policy implications / C. Feng, J.B. Huang, M. Wang, Y. Song // *J.Clean. Prod.* – 2018. – 177. – P. 837–845.

References

1. Ruzavin, A.A. Utilization of steelmaking slags by accelerated carbonation / A.A. Ruzavin // *Bulletin of SUSU. The series "Construction and Architecture"*. – 2018. – Vol. 18, No. 3. – P. 68–72. – DOI: 10.14529/build180310
2. Oreshkin, D.V. Ecological problems of integrated development of the subsoil with large-scale utilization of man-made mineral resources and waste in the production of building materials / D.V. Oreshkin // *Building materials*. – 2017. – No. 8. – P. 55–63.
3. Riding, K.A. Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking / K.A. Riding, J.L. Poole, A.K. Schindler, M.C.G. Juenger, K.J. Folliard // *ACI Materials Journal*. – 2008. – 105(2). – P. 149–155.
4. Yixin, Shao. Carbon Dioxide – Activated Steel Slag for Slag-Bonded Wallboard Application / Yixin Shao, Ahmed El-Baghdadi, Zhen He, Alfonso Mucci, Benoit Fournier // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – March 2015. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001055
5. Anastasiou, E. Utilization of fine recycled aggregate in concrete with fly ash and steel slag / E. Anastasiou, F.K. Georgiadis, M. Stefanidou // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – 50. – P. 154–161.
6. Romanenko, I.I. Building materials based on activated steelmaking slag / I.I. Romanenko, A.I. Fadin // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – №1(54). – P. 85–93.
7. Latawiec, R. Sustainable concrete performance – CO₂-emission / R. Latawiec, P. Woyciechowski, K. J. Kowalski // *Environments*. – 2018. – Vol. 5, № 2. – P. 27–41.
8. Wang, I. Assessment of carbon dioxide absorption by slag mixture of concrete structures taking into account the carbonization effect / I. Wang // *Sustainability*. – 2016. – Vol. 8, no. 4. – P. 312–330.
9. Feng, C. Energy efficiency in China's iron and steel industry: Evidence and policy implications / C. Feng, J.B. Huang, M. Wang, Y. Song // *J.Clean. Prod.* – 2018. – 177. – P. 837–845.

УДК 691.534

DOI 10.54734/20722958_2024_2_60

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

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

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

Трошев Дмитрий Владимирович,
магистрант, лаборант-исследователь
E-mail: troshchev@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

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

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate student, Assistant of the
Department «Technology of Building
Materials and Woodworking»
E-mail: lavrov0909@gmail.com

Troshchev Dmitry Vladimirovich,
Master student, laboratory researcher
E-mail: troshchev@yandex.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ
в рамках научного проекта № 23-79-01047 «Оптимизация аддитивной технологии
для производства малых архитектурных форм»

ОПТИМИЗАЦИЯ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ СМЕСИ 3D-ПРИНТЕРА

К.В. Жегера, И.Ю. Лавров, Д.В. Трошев

В современном мире формирование аддитивных технологий – одна из приоритетных задач проблем всемирной индустрии. На данный момент проблему аддитивных технологий можно считать малоизученной, так как появление перспективных разработок, а также исследований в этой сфере только лишь начинается. В связи с этим перспективным направлением деятельности является разработка рабочих составов с заданными физико-механическими свойствами.

В статье приведены результаты экспериментов по установлению закономерностей изменения прочности цементного камня в зависимости от изменения режимов синтеза синтезируемой добавки, модуля и плотности натриевого жидкого стекла. Подобран оптимальный режим синтеза добавки с содержанием синтетических цеолитов.

Ключевые слова: наноструктурирующая добавка, синтетические цеолиты, цемент, 3D-печать, рабочий состав

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Academy of Sciences within the framework of scientific project No. 23-79-01047 «Optimization of additive technology for the production of small architectural forms».

OPTIMIZATION OF THE SYNTHESIS OF A NANOSTRUCTURING ADDITIVE FOR USE IN THE WORKING MIXTURE OF A 3D PRINTER

K.V. Zhegera, I.Y. Lavrov, D.V. Troshchev

In the modern world, the formation of additive technologies is one of the priorities of the global industry. At the moment, the problem of additive technologies hasn't been studied yet and promising developments, as well as research in this area, are just beginning. In this regard, a promising area of

activity is the development of working compositions with specified physical and mechanical properties.

The article presents the results of experiments of establishing patterns of changes in the strength of cement stone depending on changes in the synthesis modes of the synthesized additive, modulus and density of sodium liquid glass. The optimal mode of synthesis of an additive containing synthetic zeolites has been selected.

Keywords: nanostructuring additive, synthetic zeolites, cement, 3D printing, working composition

В настоящий момент активно развивается технология 3D-печати. Отдельным направлением является печать декоративных элементов и малых архитектурных форм керамическими, бетонными или гипсовыми смесями [1–3]. В качестве основных материалов 3D-печати для аддитивных технологий, применяемых в строительстве, являются составы на основе минеральных вяжущих: глины, гипса или цемента.

Одним из эффективных методов управления реологическими свойствами рабочих растворов для аддитивной технологии является введение модифицирующих добавок. Большинство модифицирующих добавок производится за рубежом, что приводит к сложностям с закупками и, следовательно, удорожанию смеси [4–6].

Решением данной проблемы может стать применение цеолитов в качестве модифицирующей добавки. Интерес вызывают синтетические цеолиты, которые можно применять в качестве модифицирующей добавки с заданными свойствами. Существует множество способов получения синтетических цеолитов, одним из которых является гидротермальная кристаллизация щелочных алюмосиликатных смесей [7–11].

Несмотря на многообразие способов получения синтетического цеолита, не все они подходят для введения в рабочую смесь для 3D-печати малых архитектурных форм. Поэтому нас интересует оптимизация синтеза наноструктурирующей добавки с содержанием цеолита для применения ее в качестве модифицирующей в составе рабочей смеси для 3D-принтера [12].

В табл. 1 представлены значения прочности исследуемых образцов с введением в их состав синтетической добавки, изготовленной при разных режимах синтеза.

Т а б л и ц а 1

Результаты проведения испытаний на прочность образцов

Режим синтеза добавки	Прочность, МПа
Контрольный образец (цемент+вода)	35,4
Синтез из раствора алюминия 10 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:1	25,7
Синтез из раствора алюминия 10 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:2	38,2
Синтез из раствора алюминия 15 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:1	43,9
Синтез из раствора алюминия 15 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:2	52,6
Синтез из раствора алюминия 20 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:1	49,8
Синтез из раствора алюминия 20 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:2	58,3

Из представленных в табл.1 данных следует, что цементные композиты с применением синтетической добавки, синтезированной из раствора алюминия 15 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:2 обладают достаточной прочностью и соотношение компонентов в добавке является оптимальным.

Исследовано влияние значения модуля жидкого натриевого стекла, используемого при приготовлении добавки, на изменение прочности при сжатии образцов, изготовленных на цементном вяжущем (табл. 2).

Прочность на сжатие образцов цементного камня в зависимости от модуля натриевого жидкого стекла

Модуль жидкого натриевого стекла	Прочность при сжатии, МПа
2,7	50,5
2,8	51,3
2,9	52,6

Установлено, что при увеличении модуля жидкого натриевого стекла [31] происходит повышение предела прочности при сжатии цементных композитов (см. табл. 2).

Выявлено, что максимальной прочностью при сжатии обладают цементные композиты с применением синтетической добавки, приготовленной на жидком натриевом стекле с плотностью, равной $\rho=1367 \text{ кг/м}^3$, $R_{сж} - 7,60 \text{ МПа}$ (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Прочность на сжатие цементного камня в зависимости от плотности натриевого жидкого стекла

Плотность жидкого стекла, кг/м^3	Прочность при сжатии цементного композита, МПа
1368	52,6
1279	52,1
1180	51,4
1113	50,7
1038	50,0

Для обеспечения эффективности применения предлагаемой неорганической нанодисперсной добавки необходимо выбрать оптимальный режим синтеза. С этой целью в работе спланирован полный двухфакторный эксперимент с квадратичной моделью [13–15].

Параметром оптимизации служила прочность при сжатии цементных композитов. В качестве факторов, оказывающих действие на прочность цементного камня, приняты: концентрация раствора алюминия сульфата и соотношение раствора алюминия сульфата к натриевому жидкому стеклу. Графическая интерпретация составленной модели представлена на рис. 1.

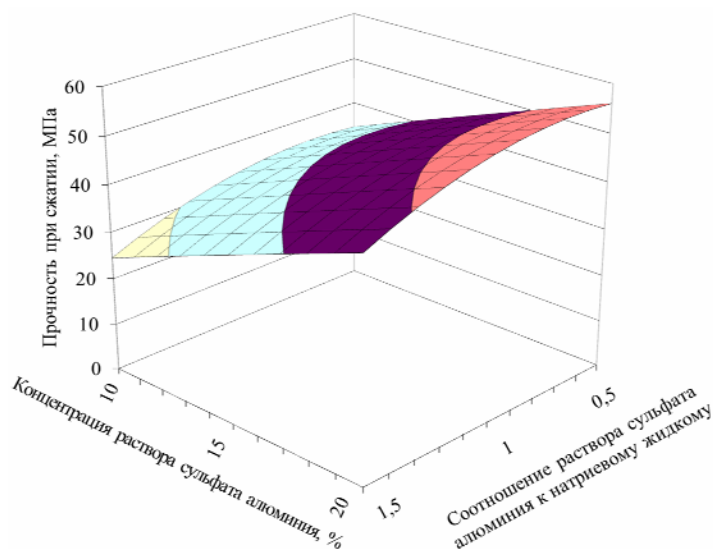


Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие цементного камня от технологических факторов синтеза добавки

Таким образом, оптимальным режимом приготовления синтетической добавки является использование алюминия сульфата в виде 15 %-го раствора и с соотношением раствора сульфата алюминия к натриевому жидкому стеклу Ал:Жс, равным 1:2 (0,5).

Исследованы физико-химические показатели полученной синтетической добавки, представленные (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Физико-химические показатели синтетической добавки

Наименование показателя	Значение показателя
Внешний вид	Порошок белого цвета
Активность, мг/г	350
Удельная поверхность, $S_{уд}$, м ² /кг	688,6
Плотность насыпная, кг/м ³	568,2
Плотность истинная, кг/м ³	2140

Микроструктура синтетической добавки исследована с помощью электронного растрового микроскопа и представлена на рис. 2.

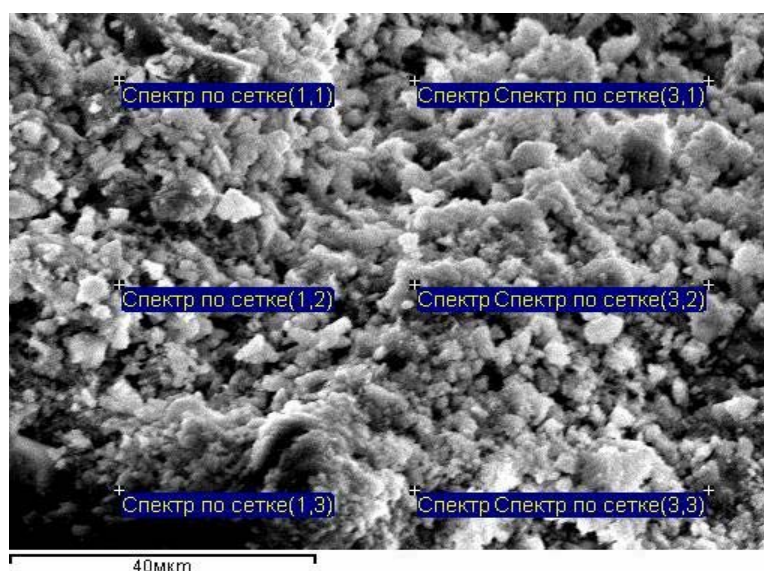


Рис. 2. Микроструктура синтетических цеолитов

Установлено, что микроструктура добавки представлена частицами округлой формы с размерами 5,208–5,704 мкм, также присутствуют частицы лещадной формы с размерами 7,13–8,56 мкм. Химический состав синтетической добавки представлен в табл. 5 по спектрам, представленным на рис. 2.

Т а б л и ц а 5

Химический состав полученной добавки

Спектр (по данным рис.2)	Химические элементы добавки, весовые %				
	O	Na	Al	Si	S
Спектр по сетке (1,1)	52.42	24.23	1.10	7.92	14.34
Спектр по сетке (3,1)	57.71	8.61	2.59	31.09	-
Спектр по сетке (1,2)	60.69	12.36	8.29	17.27	1.40
Спектр по сетке (3,2)	60.23	8.67	3.15	27.95	-
Спектр по сетке (1,3)	36.73	10.67	2.66	31.26	18.69
Спектр по сетке (3,3)	60.00	10.22	1.75	27.35	0.68
Среднее	48.71	16.42	4.70	19.59	9.67

Таким образом, для создания рецептуры рабочей смеси для 3D-печати следует применять добавку на основе синтетических цеолитов, синтезированную из раствора алюминия 15 % и жидкого стекла, с соотношением Ал:Жс = 1:2.

Список литературы

1. Колесников, А.Г. Модернизация конструкции экструдера строительного 3D-принтера и подбор составов для него / А.Г. Колесников // Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 64–70. – URL: <https://doi.org/10.7256/2310-8673.2019.2.29597>
2. Рацинский, Н.В. 3D-принтеры, используемые в строительной отрасли / Н.В. Рацинский, В.А. Хватынец // Научная платформа: дискуссия и полемика: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Кемерово, 13 сентября 2021 года. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью «Западно-Сибирский научный центр», 2021. – С. 23–25.
3. Османов, С.Г. К вопросу о возможностях и области рационального применения технологии 3D-печати строительных конструкций / С.Г. Османов, М.А. / Колотиенко // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9 (60). – С.64.
4. Ting, G.H.A. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties / G.H.A. Ting, Y.W.D. Tay, Y. Qian, M.J. Tan // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2019. – №29. – P. 00857. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00857>
5. Дребезгова, М.Ю. Влияние суперпластификатора sikaplast 2135 на реологические свойства гипсоцементных паст / М.Ю. Дребезгова, Н.В. Чернышева, А.С. Евсюкова, Д.Н. Кладиева // Фундаментальные основы строительного материаловедения. – 2017. – С. 211–217.
6. Panda, B. Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay / B. Panda, S. Ruan, C. Unluer, M.J. Tan // Composites PartB Engineering. – 2019. – №165. – P.75–83.
7. Шилина, А.С. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента / А.С. Шилина, В.К. Мильничук // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т.10, №2. – С.237–245.
8. Патент 2452688 Российская Федерация, C01B39/16, C01B39/20 Способ получения цеолита NaA или NaX / Л.К. Казанцева (RU), патентообладатель учреждение Российской академии наук Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева. – 4 с.
9. Патент 2056354 Российская Федерация, C01B39/00 Способ получения цеолита / С.В. Дударев (RU), К.Г. Ионе (RU), А.В. Токтарев (RU) патентообладатель Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. – 4 с.
10. Патент 2083493 Российская Федерация, C01B39/02 Способ получения цеолита / Л.С. Нам (RU), А.В. Шумовский (RU), С.А. Малютин (RU) патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара. – 4 с.
11. Патент 2313488 Российская Федерация, C01B39/48 Синтетический цеолит и способ его получения / В.И. Ерофеев (RU), Л.М. Коваль (RU) Общество с ограниченной ответственностью «Томскнефтехим» (ООО «Томскнефтехим»). – 10 с.
12. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – №4 (652). – С.37–42.
13. Данилов, А.М. Математическое моделирование структуры и свойств материалов нового поколения / А.М. Данилов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т.15, №5. – С.876–877.
14. Афанасьева, Н.Ю. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента / Н.Ю. Афанасьева. – М.: КНОРУС, 2010. – 336 с.

15. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи, 2005. – 296 с.

References

1. Kolesnikov, A.G. Modernization of the construction of the extruder of a construction 3D printer and the selection of compositions for it / A.G. / Kolesnikov // *Urbanistics*. – 2019. – No. 2. – P. 64-70. – URL: <https://doi.org/10.7256/2310-8673.2019.2.29597>
2. Raschinsky, N.V. 3D printers used in the construction industry / N.V. Raschinsky, V.A. Khvatynets // *Scientific platform: discussion and polemic: Collection of materials of the International scientific and practical Conference, Kemerovo, September 13, 2021*. – Kemerovo: Limited Liability Company «West Siberian Scientific Center», 2021. – P. 23–25.
3. Osmanov, S.G. On the possibilities and scope of rational application of 3D printing technology for building structures / S.G. Osmanov, M.A. Kolotienko // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2019. – № 9 (60). – P.64.
4. Ting, G.H.A. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties / G.H.A. Ting, Y.W.D. Tay, Y. Qian, M.J. Tan // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2019. – №29. – P. 00857. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00857>
5. Drebezgova, M.Yu. The effect of the sikaplast 2135 superplasticizer on the rheological properties of gypsum cement pastes / M.Yu. Drebezgova, N.V. Chernysheva, A.S. Evsyukova, D.N. Kladieva // *Fundamental principles of building materials science*. – 2017. – P. 211–217.
6. Panda, B. Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay / B. Panda, S. Ruan, C. Unluer, M.J. Tan // *Composites PartB Engineering*. – 2019. – №165. – P.75–83.
7. Shilina, A.S. Sorption purification of natural and industrial waters from heavy metal cations and radionuclides by a new type of high-temperature aluminosilicate adsorbent / A.S. Shilina, V.K. Milnichuk // *Sorption and chromatographic processes*. – 2010. – Vol.10, No.2. – P.237–245.
8. Patent 2452688 Russian Federation, C01B39/16, C01B39/20 Method for obtaining zeolite NaA or NaX / L.K. Kazantseva (RU), patent holder institution of the Russian Academy of Sciences Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev. – 4 p.
9. Patent 2056354 Russian Federation, C01B39/00 Method of obtaining zeolite / S.V. Dudarev (RU), K.G. Ione (RU), A.V. Toktarev (RU) patent holder G.K. Boreskov Institute of Catalysis SB RAS. – 4 p.
10. Patent 2083493 Russian Federation, C01B39/02 Method of obtaining zeolite / L.S. Nam (RU), A.V. Shumovsky (RU), S.A. Malyutin (RU) patent holder A.A. Bochvar All-Russian Scientific Research Institute of Inorganic Materials. – 4 p.
11. Patent 2313488 Russian Federation, C01B39/48 Synthetic zeolite and the method of its preparation / V.I. Erofeev (RU), L.M. Koval (RU) Limited Liability Company «Tomskneftekhim» (LLC «Tomskneftekhim»). – 10 p.
12. Loganina, V.I. Rheological properties of a composite lime binder with the use of synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // *Izvestia of higher educational institutions. Construction*. – 2013. – №4 (652). – P.37–42.
13. Danilov, A.M. Mathematical modeling of the structure and properties of new generation materials / A.M. Danilov // *Review of applied and industrial mathematics*. – 2008. – Vol.15. – No.5. – P.876–877.
14. Afanasyeva, N.Yu. Computational and experimental methods of scientific experiment / N.Yu. Afanasyeva. – M.: KNORUS, 2010. – 336p.
15. Grachev, Yu.P. Mathematical methods of planning experiments / Yu.P. Grachev, Yu.M. Plaksin. – M.: Delhi, 2005. – 296 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

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

Рыжов Антон Дмитриевич,
ассистент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: penza48@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Ryzhov Anton Dmitrievich,
Assistant at the Department «Information and
Computing Systems»
E-mail: penza48@yandex.ru

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ

В.И. Логанина, А.Д. Рыжов

Приведены сведения о фотокаталитических свойствах поверхности известкового покрытия на основе состава с оксидом цинка. Предложено применять в качестве инертного носителя фотокатализатора синтетический цеолит. Описаны технология получения и свойства синтетического цеолита. Фотокаталитическая активность ZnO с применением синтетического цеолита исследовалась путем фотодеструкции красителя метиленового синего под действием УФ света. Установлено повышение фотокаталитических свойств поверхности известкового покрытия на основе состава с применением оксида ZnO и алюмосиликатной добавкой.

Ключевые слова: фотокатализ, оксид цинка, синтетические гидроалюмосиликаты, известковое покрытие

PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF LIME COATINGS WITH ADDITIVES BASED ON SYNTHETIC ALUMINOSILICATES

V.I. Loganina, A.D. Ryzhov

Some information on the photocatalytic properties of the surface of a lime coating based on a composition with zinc oxide is provided. It is proposed to use synthetic zeolite as an inert carrier of the photocatalyst. The technology of producing and the properties of synthetic zeolite are described. The photocatalytic activity of ZnO using synthetic zeolite has been investigated by photodegradation of methylene blue dye under UV light. An increase in the photocatalytic properties of the surface of a lime coating based on a composition using ZnO oxide and an aluminosilicate additive has been established.

Keywords: photocatalysis, zinc oxide, synthetic hydroaluminosilicates, lime coating

В настоящее время вследствие повышения требований к эстетическим характеристикам архитектурных зданий и сооружений важным является не только обеспечение долговечности защитно-декоративных покрытий фасадов зданий, но и возможность минимизации расходов по их содержанию и уходу. Растущий интерес к технологиям фотокаталитических композиционных покрытий вызывает необходимость проведения исследований, направленных на разработку рецептуры известковых составов, покрытия на основе которых обладают способностью к самоочищению.

Существует два типа самоочищающегося покрытия: гидрофобное и гидрофильное. Самоочищающееся гидрофобное покрытие отталкивает пыль и грязь, как бы скатывая частицы со своей поверхности; самоочищающееся гидрофильное покрытие с помощью механизма фотокатализа уменьшает количество загрязняющих веществ и пыли на поверхности под воздействием УФ-излучения

Для придания самоочищающихся свойств покрытий в рецептуру составов вводят фотокатализаторы [1–3]. Из всех существующих фотокатализаторов самое широкое применение на данный момент нашли нано- и микроразмерный TiO_2 анатазной модификации, оксид цинка ZnO и другие [4–7].

В последние годы в фотокаталитических технологиях находит применение полупроводник оксид цинка ZnO , поскольку он дешевле, имеет более высокую квантовую эффективность, экологически безопасен и обладает хорошей фотокаталитической активностью. Однако ZnO имеет большую запрещенную зону (около 3,37 эВ), так что может поглощать только УФ-свет с длиной волны менее 387 нм. Для модификации ZnO с целью повышения его активности в области видимого света применяют легирование ZnO атомами металлов, таких, как Fe/ZnO и Co/ZnO , или неметаллов, таких, как ZnO , легированный N [9].

Известно получение фотокаталитических композиционных материалов путем осаждения частиц фотокатализатора на инертные носители. В качестве инертных подложек используют диоксид кремния, активированный углерод, морденит, цеолит [10, 11].

Представляет интерес исследование возможности применения синтетических цеолитов в качестве подложек. Нами разработана технология синтеза алюмосиликатной добавки, заключающаяся в добавлении микродисперсных порошков алюминия в натриевое жидкое стекло при температуре 60–90 °С в течение 30–120 минут [12–14]. Синтезируемая добавка представляет собой легкий порошок светло-серого цвета (размер частиц 2–20 мкм) с насыпной плотностью $0,55 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$. В ходе синтеза добавки образуется большое количество газообразного молекулярного водорода, который создает в добавке поры различного размера и формы. Выход готового продукта составляет 90 %. Химический состав синтезируемой добавки представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав синтезируемой добавки

Интервал изменения	Наименование элементов, %										
	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Cu
Макс	6,35	7,48	0,51	29,10	0,02	28,13	19,94	0,06	0,03	0,08	0,25
Мин	2,12	4,86	0,08	6,15	0,00	3,55	3,26	0,02	0,00	0,03	0,08

Рентгенофазовый анализ показал, что минеральный состав образца в основном представлен наноструктурированным кремнеземом и алюмосиликатами натрия. Аморфная фаза представлена алюминатом натрия. Содержание аморфной фазы составляет 83 %.

Выявлено высокое содержание оксидов Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , составляющее 51,03 %, 36,36 %, 11,89 % соответственно.

Установлено, что кислотно-основные центры поверхности образца добавки характеризуются преобладанием центров по Бренстеду. Содержание активных центров в области $\text{pK}_a < 7$ составляет 53,72 ммоль/г, в области $\text{pK}_a > 13$ – 7,70 ммоль/г.

Проведенные исследования подтвердили эффективность применения данной добавки в известковых сухих строительных смесях. Установлено, что максимальная прочность известковых композитов достигается при введении добавки в количестве 10 % от массы извести. Так, прочность при сжатии образцов после 28 суток воздушного твердения с применением добавки равна $R_{сж} = 2,71 \text{ МПа}$.

Высокое содержание SiO_2 , а также результаты исследований кислотно-основных свойств поверхности алюмосиликатной добавки указывают на ее способность к активному взаимодействию с фотокатализатором. Представленные данные позволяют сделать вывод, что синтезируемая добавка на основе алюмосиликатов способна выступать в качестве носителя для фотокатализатора

На эффективность гетерогенного фотокатализа в основном влияет значение удельной поверхности фотокатализатора. Существует два основных эффективных способа увеличения площади поверхности фотокатализатора: уменьшение размера частиц фотокатализатора и иммобилизация фотокатализатора на поверхности носителя с большой удельной поверхностью

Для создания развитой поверхности фотокатализатора, интенсификации диффузионных процессов реагентов фотокаталитических реакций и увеличения площади контакта фотокатализатора с загрязнителем, а также поглощения и задержания в объеме фотокатализатора на более долгое время волн ультрафиолетового излучения применяли механический помол оксида цинка ZnO в планетарной мельнице. Измельчение проводили в течение 1,5, 2,5 и 3,5 ч. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Удельная поверхность оксида цинка в зависимости от времени измельчения

Удельная поверхность, S , $\text{м}^2/\text{г}$	Время измельчения, ч				
	0	0,5	1,5	2,5	3,5
	5,4	5,9	6,2	6,8	8,5

Для иммобилизации фотокатализатора на поверхности носителя применяли смешивание оксида цинка с алюмосиликатной добавкой.

Фотокаталитическую активность ZnO исследовали путем фотодеструкции красителя метиленового синего (МС) под действием УФ света. Эксперименты проводили с помощью УФ-лампы с диапазоном излучения 315–400 нм мощностью 18 Вт, которую помещали непосредственно над раствором на расстоянии 10 см от образца. Концентрация красителя составляла 0,1–0,2 г/л. Количество фотокатализатора составляло 0,5–1,5 % объема облучаемого раствора. Для определения степени деградации МС в зависимости от удельной поверхности и концентрации ZnO через равные промежутки времени отбирали от суспензии пробы и определяли значение оптической плотности раствора с помощью спектрофотометра при длине волны 664 нм. Результаты исследований зависимости оптической плотности от времени облучения приведены на рис. 1–4.

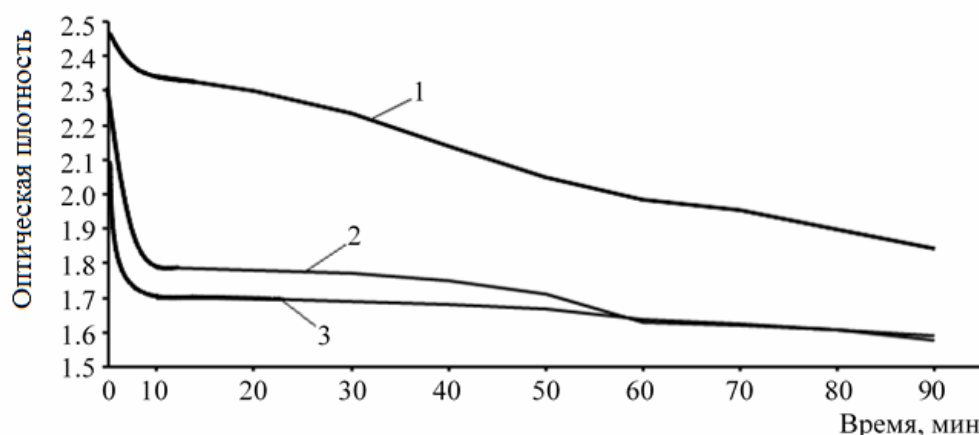


Рис. 1. Зависимость оптической плотности раствора красителя метиленового синего от времени облучения при содержании оксида цинка удельной поверхностью $S=5,9 \text{ м}^2/\text{г}$:
1 – 1,5 %; 2 – 1 %; 3 – 0,5 %

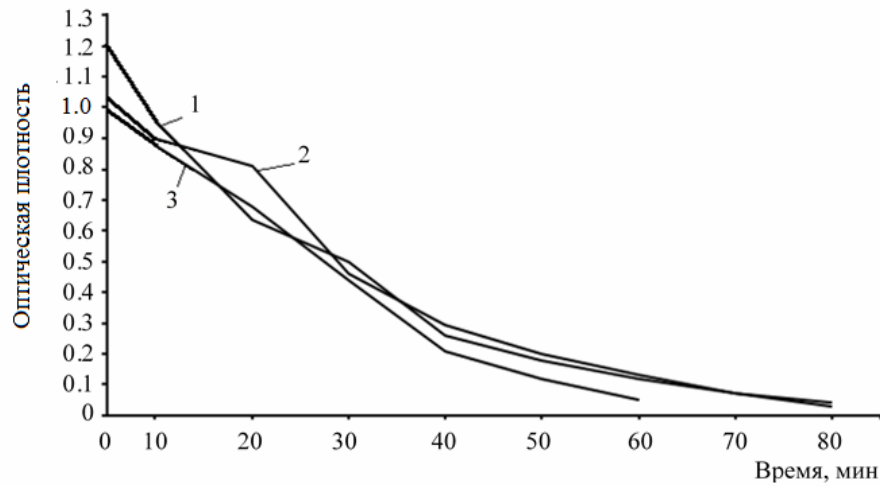


Рис. 2. Зависимость оптической плотности раствора красителя метиленового синего от времени облучения при содержании оксида цинка удельной поверхностью $S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$:
1 – 1,5 %; 2 – 1 %; 3 – 0,5 %

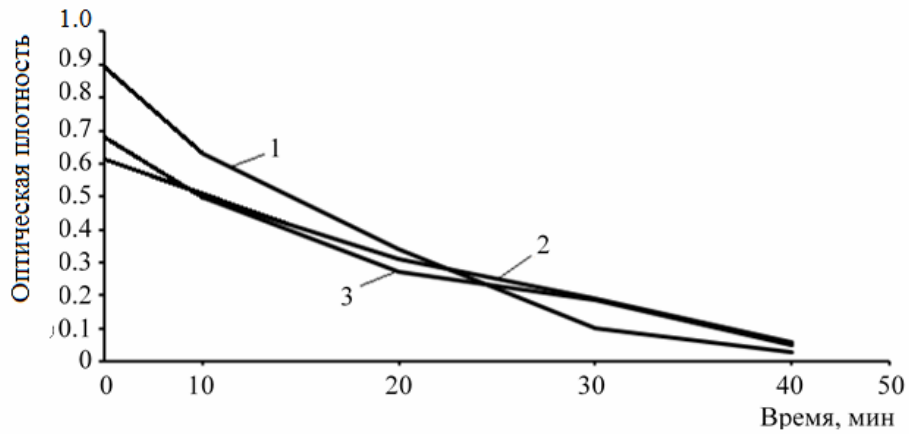


Рис. 3. Зависимость оптической плотности раствора красителя метиленового синего от времени облучения при содержании оксида цинка удельной поверхностью $S = 8,5 \text{ м}^2/\text{г}$:
1 – 1,5 %; 2 – 0,5 %; 3 – 1,0 %

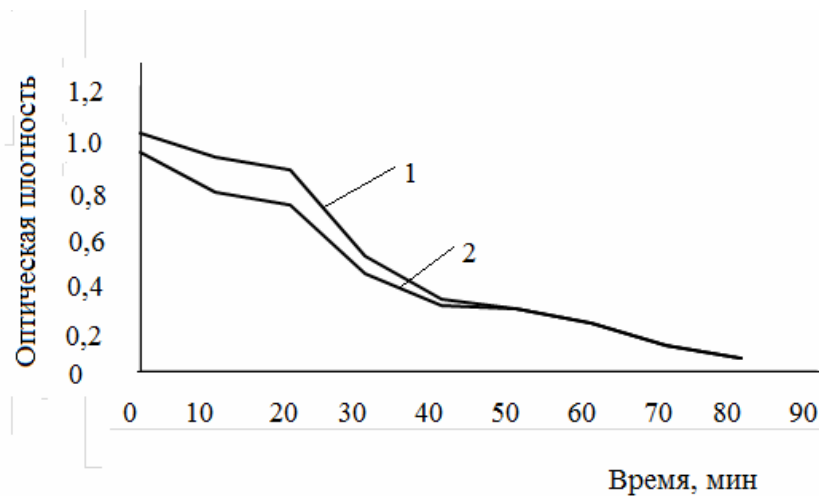


Рис. 4. Зависимость оптической плотности раствора красителя метиленового синего от времени облучения при содержании оксида цинка удельной поверхностью $S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$:
1 – 1,0 %; 2 – 1 % + 1 % алюмосиликатной добавки

Результаты исследований показывают, что с увеличением концентрации оксида цинка наблюдается большая скорость обесцвечивания раствора. Установлено, что наибольшей фотокаталитической активностью обладает оксид цинка, удельная поверхность которого составляет $8,5 \text{ м}^2/\text{г}$. Максимальная скорость обесцвечивания раствора красителя метиленового синего наблюдается, если применяется фотокатализатор, иммобилизованный на поверхности алюмосиликатной добавки (см. рис. 4).

Дополнительно для оценки фотокаталитической активности изготовили образцы покрытия на основе известкового состава с добавкой на основе синтезируемых алюмосиликатов и оксида цинка. Образцы помещали в установку с диапазоном УФ-излучения 315–400 нм (рис. 5). Тест проводился в возрасте 7 суток.

Для окраски приготовленный раствор красителя метиленового синего наносился на подготовленную поверхность образцов. Результаты представлены на рис. 6.

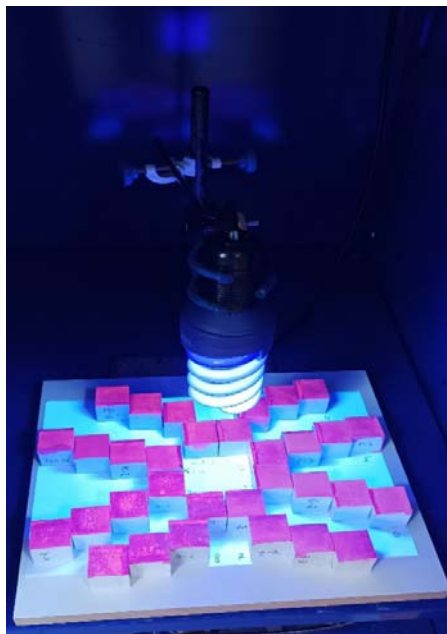


Рис. 5. УФ-установка с облучаемыми образцами покрытия

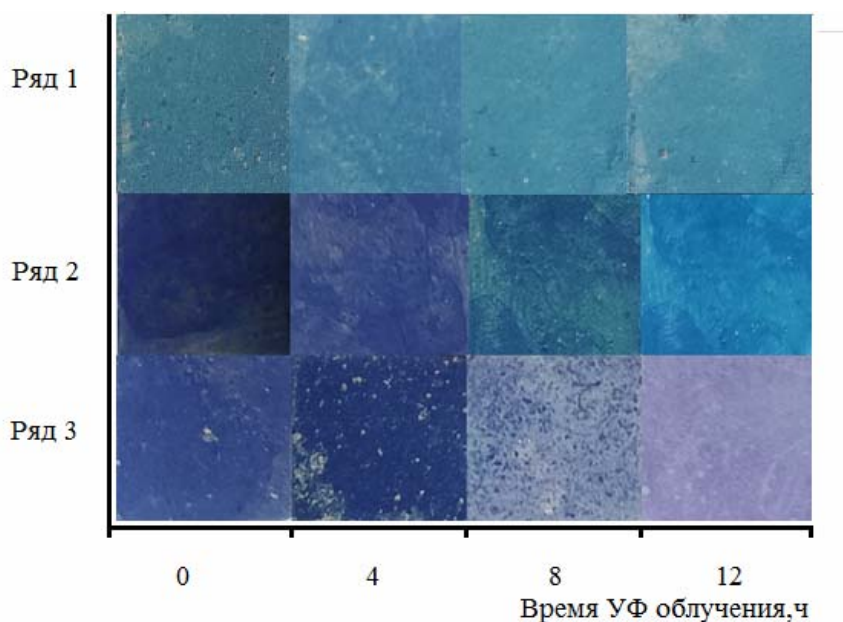


Рис. 6. Деградация раствора метиленового синего на поверхности известкового покрытия.

Состав содержит:

ряд 1 – 5 % ZnO ($S= 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$); ряд 2 – 10 % ZnO ($S= 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$);
ряд 3 – 10 % алюмосиликатной добавки + 10 % ZnO ($S= 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$)

Фотофиксация деградации метиленового синего в поверхностном слое покрытия проводилась каждые 4 часа с момента облучения. Представленные результаты свидетельствуют об эффективности применения оксида цинка, иммобилизованного на алюмосиликатной добавке (рис. 6, ряд 3). Образец покрытия на основе известкового вяжущего с фотокатализатором без иммобилизации на поверхности алюмосиликатной добавки показал более низкую фотокаталитическую способность (рис. 6, ряд 1, 2).

Таким образом, проведенные исследования установили эффективность применения фотокатализатора оксида цинка совместно с синтезированными алюмосиликатами при изготовлении известковых самоочищающихся покрытий.

Список литературы

1. Tolstoy, A.D. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, I.O. Vodopyanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). Article No 012156.
2. Лукутцова, Н.П. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нано-дисперсного диоксида титана / Н.П. Лукутцова, О.А. Постникова, Г.Н. Соболева, Д.В. Ротарь, Е.В. Оглоблина // Строительные материалы. – 2015. – No 11. – С. 5–8.
3. Лукутцова, Н.П. Эффективность применения нанодисперсного диоксида титана в фотокатализе / Н.П. Лукутцова, О.А. Постникова, А.А. Пыкин, И.А. Ласман, М.Ю. Солодухина, Е.А. Бондаренко, Л.А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – No 3. – С. 54–57.
4. Кировская, И.А. Каталитические и фотокаталитические свойства компонентов систем InP-CdS, ZnTe-CdS / И.А. Кировская, О.Т. Тимошенко, Е.О. Карпова // Журнал физической химии. – 2011. – Т. 85, No 4. – С. 633–636.
5. Фаликман, В.Р. Новые высокоэффективные нанодобавки для фотокаталитических бетонов: синтез и исследование / В.Р. Фаликман, А.Я. Вайнер // Нанотехнологии в строительстве. – 2015. – Т. 7, No 1. – С. 18–28.
6. Chen, J. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications / J. Chen, C. Poon // Building and Environment. – 2009. – Vol. 44. – P. 1899–1906.
7. Aissa, A.H. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal / A.H. Aissa, E. Puzenat, A. Plassais, J.M. Herrmann, C. Haehnel, C. Guillard // Applied Catalysis B: Environment. – 2011. – Vol. 107 (1–2). – P. 1–8.
8. Баталова, В.Н. Фотокаталитическое разрушение органических загрязнителей воды с использованием Fe-содержащих природных и синтетических материалов / В.Н. Баталова [и др.] // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 31, № 7. – С. 73–84.
9. Zhang, J. Fabrication and characterization of Eu²⁺-doped lanthanum-magnesium-gallium / TiO₂-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation / J. Zhang, Z. Liu // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45 (8). – P. 10342–10347.
10. Губарева, Е.Н. Сравнительная оценка активности кремнеземного сырья и фотокаталитического композиционного материала на его основе / Е.Н. Губарева, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, М.В. Лабузова // Обогащение руд. – 2019. – No 6. – С. 25–30.
11. Лабузова, М.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе / М.В. Лабузова, Е.Н. Губарева, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова // Строительные материалы. – 2019. – No 5. – С. 16–21.
12. Loganina, V.I. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // Case Studies in Construction Materials. – 2015. – Vol. 3. – P. 132–136.
13. Loganina, V.I. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 409–413.

14. Loganina, V.I. Additive based on aluminosilicates for lime dry mortar mixes / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov, Y.P. Skachkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 012028.

References

1. Tolstoy, A.D. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, I.O. Vodopyanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). Article No 012156.
2. Lukutsova, N.P. Photocatalytic coating based on the addition of nanodispersed titanium dioxide / N.P. Lukutsova, O.A. Postnikova, G.N. Soboleva, D.V. Rotar, E.V. Ogloblina // Construction materials. – 2015. – No. 11. – P. 5–8.
3. Lukutsova, N.P. Efficiency of using nanodispersed titanium dioxide in photocatalysis / N.P. Lukutsova, O.A. Postnikova, A.A. Pykin, I.A. Lasman, M.Yu. Solodukhina, E.A. Bondarenko, L.A. Suleymanova // Vestnik BSTU im. V.G. Shukhova. – 2015. – No. 3. – P. 54–57.
4. Kirovskaya, I.A. Catalytic and photocatalytic properties of components of the InP-CdS, ZnTe-CdS systems / I.A. Kirovskaya, O.T. Timoshenko, E.O. Karpova // Journal of Physical Chemistry. – 2011. – Vol. 85, No. 4. – P. 633–636.
5. Falikman, V.R. New highly effective nanoadditives for photocatalytic concrete: synthesis and research / V.R. Falikman, A.Ya. Weiner // Nanotechnologies in construction. – 2015. – Vol. 7, No. 1. – P. 18–28.
6. Chen, J. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications / J. Chen, C. Poon // Building and Environment. – 2009. – Vol. 44. – P. 1899–1906.
7. Aissa, A.H. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal / A.H. Aissa, E. Puzenat, A. Plassais, J.M. Herrmann, C. Haehnel, C. Guillard // Applied Catalysis B: Environment. – 2011. – Vol. 107 (1–2). – P. 1–8.
8. Batalova, V.N. Photocatalytic destruction of organic water pollutants using Fe-containing natural and synthetic materials / V.N. Batalova [et al.] // Butlerov communications. – 2012. – Vol. 31, No. 7. – P. 73–84.
9. Zhang, J. Fabrication and characterization of Eu²⁺-doped lanthanum-magnesium-gallium / TiO₂-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation / J. Zhang, Z. Liu // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45 (8). – P. 10342–10347.
10. Gubareva, E.N. Comparative assessment of the activity of silica raw materials and photocatalytic composite material based on it / E.N. Gubareva, Yu.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, M.V. Labuzova // Ore enrichment. – 2019. – No. 6. – P. 25–30.
11. Labuzova, M.V. Use of photocatalytic composite material in a cement system / M.V., Labuzova E.N. Gubareva, Yu.N. Ogurtsova, V.V. Strokova // Construction materials. – 2019. – No. 5. – P. 16–21.
12. Loganina, V.I. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // Case Studies in Construction Materials. – 2015. – Vol. 3. – P. 132–136.
13. Loganina, V.I. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 409–413.
14. Loganina, V.I. Additive based on aluminosilicates for lime dry mortar mixes / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov, Y.P. Skachkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 012028.

УДК 69: 620.22: 519.7

DOI 10.54734/20722958_2024_2_73

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

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

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, editor-in-chief of the
editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА С ВАРИАЦИЕЙ СТРУКТУРЫ И ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ СИНТЕЗЕ МАТЕРИАЛА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

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

На основе опыта создания материалов приведены подходы к фундаментализации синтеза материалов: представление материала в виде сложной системы (на первых порах – слабо структурированной, с противоречивыми целями и критериями); оценка качества композиционных материалов; формализация кинетических процессов; управление качеством материалов; минимизация размерности критериального пространства; многокритериальная оптимизация. Обозначен сдвиг парадигм, основанных на базовых моделях непрерывной саморазвивающейся среды, в сторону парадигм, основанных на моделях структурированной саморазвивающейся среды, основанных на идеях и методах системного подхода и синергетики.

Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, разработка, методологические принципы, системный подход, технологии

TECHNOLOGIES OF SYSTEM ANALYSIS WITH VARIATION OF STRUCTURE AND VALUES OF MODEL PARAMETERS IN THE SYNTHESIS OF A MATERIAL AS A COMPLEX SYSTEM

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Based on the experience of creating materials, some approaches to fundamentalizing the synthesis of materials are presented: presenting the material in the form of a complex system (at first, weakly structured, with conflicting goals and criteria); assessment of the quality of composite materials; formalization of kinetic processes; materials quality management; minimizing the dimension of the criterion space; multicriteria optimization. A shift in paradigms based on basic models of a continuous

self-developing environment towards paradigms based on models of a structured self-developing environment based on the ideas and methods of a system approach and synergetics is indicated.

Keywords: composite materials, complex systems, development, methodological principles, systems approach, technologies

Многие задачи строительного материаловедения по сути являются слабоструктурированными, слабоформализуемыми; содержат множество противоречивых целей и критериев и, как правило, требуют новых способов решения задач с нечеткими знаниями, целями и данными [1]: при их решении возможны значительные неопределенности, связанные с недостаточностью и нечеткостью знаний о проблеме; невозможностью учета реакций окружающей среды.

Управление сложными объектами осложняется с их взаимосвязанностью: влияние множества управляемых величин и необходимость учета их взаимосвязи. Проблема оптимизации таких систем сводится к экстремизации функционалов с дополнительной проблемой, связанной с большой размерностью: пока слабо разработаны научно-обоснованные методы задач управления, а существующие методы управления таких задач малопригодны. Возникла необходимость разработки методологии моделирования сложных развивающихся систем при неполных и нечетких знаниях со слабой формализацией задач [1...4].

Успешно применяются когнитивные модели, основанные на использовании аппарата знако- и взвешенных графов. Удобным инструментом исследования слабоструктурированных, плохо формализуемых систем оказалась когнитивная структура, позволяющая углубленное понимание проблем с выявлением противоречий в их качественном анализе.

Когнитивный анализ и моделирование являются новыми элементами в структуре систем поддержки принятия решений. Когнитивный подход может использоваться в технических задачах случая, когда построение точных числовых моделей затруднительно или невозможно из-за отсутствия требуемой числовой информации [5].

Заметим, управление системой не сводится только к достижению целей, оно служит средством поддержания целостности любой сложной системы и стимулирования ее саморазвития.

В основе принципов управления любой системы лежат два основных системных свойства:

- обеспечение заданной цели функционирования;
- обеспечение стабильности существования и защищенность от внешнего воздействия.

При исследовании систем часто используется их аналогия в структуре (характер связей между элементами вплоть до одинаковости в структуре). Интуитивному понятию одинаковости структуры в математике формализуется понятием изоморфизма. Одинаковость структуры фактически означает различный смысл системообразующих отношений, равно как и различие элементов систем при их сопоставлении. Одинаковость структуры нередко оказывается достаточной для выявления и переноса на другие системы глубоких системных свойств: изоморфизм понятий, утверждений, теорий. При этом соответствующие друг другу элементы в исходных системах имеют различный смысл (изоморфизм свойств систем и знаний о них являются теоретическим следствием изоморфизма систем в классическом смысле).

Если понятие изоморфизма используется без существенного прояснения, в чем состоит аналогия, по существу, нельзя обосновать перенос свойств известных систем на новые менее изученные системы (перенос на новые системы в большей степени играет роль предвидения, чем обоснования).

При отсутствии взаимной однозначности между системами вместо изоморфизма будет гомоморфизм (аналогии между двумя системами меньше, чем при изоморфизме). Наличие изоморфизма и гомоморфизма позволяет создавать соответствующие модели систем (изоморфные и гомоморфные аналоги).

Если одни системы изучены досконально и глубоко, то знание о них при наличии изоморфизма или гомоморфизма можно перенести и распространить на другие с одновременным использованием их исследований.

Чем неопределеннее управление, чем меньше оно поддается алгоритмизации, тем сложнее система и важнее роль человека по принятию управленческих решений.

Источником функционирования системного комплекса является необходимость осуществления взаимодействия между системами. Системный подход условно можно считать внутрисистемным, а системно-комплексный подход условно можно считать межсистемным подходом.

При рассмотрении системных комплексов целостность традиционно заменяется понятием единства (понятие более широкое, менее определенное и менее строгое).

Как видим, развитие системного подхода для решения этих проблем должно проходить через накопление, обобщение и систематизацию для осмысления и структурирования сложных ситуаций на основе общего понятия систем и развития методов их применения. К таким вопросам относятся формализованные количественные и качественные модели размытого понятия системы с определением условий их адекватного применения со структурированием сложных проблемных ситуаций с возможностью их скорейшего решения. Ниже нашли отражение результаты многолетних исследований авторов по системному подходу к синтезу строительных материалов [6...9].

Существуют различные методы идентификации, основанные на разных подходах к форме задания идентификационных моделей. Ошибки идентификации, естественно, приводят к ошибкам в управлении или в требуемом выходном параметре системы. Большой оптимизм придает «Принцип (закон) 100 %-й эффективности математики» А.Г. Бутковского. Наиболее емко проблемы анализа сложных систем отмечались И.В. Прангишвили: «Важный недостаток современного управления сложными системами заключается в отсутствии системного (целостного) подхода. Для понимания системного подхода как единого целостного подхода к системе нужно помнить, что отдельные части (подсистемы) системы настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других ее частях. Поэтому часто не работает метод декомпозиции системы на ее отдельные части и исследования ее как более простых, а далее синтеза системы из ее отдельных более простых частей. На самом деле, надо оценивать и анализировать систему как целостную или единую, и нельзя осуществить анализ и оценку системы после ее декомпозиции на более простые части». Пока в теории идентификации доминирует математический уровень строгости; математический язык рассматривается как наилучшее средство представления системы. Идентификация рассматривается как дуальная по отношению к задаче управления системой; нельзя управлять системой, если она не идентифицирована (заранее либо в процессе управления). Естественно, знание результатов идентификации до начала процесса управления существенно влияет на его реализацию.

Выбор метода идентификации определяется неоднозначно: неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т. п. Идентификация относится к классу некорректных задач; необходима оценка влияния ошибок идентификации на качество управления системой по результатам идентификации. Адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать: модель может быть принята либо отвергнута лишь с учетом наблюдений ее характера, которые могут использоваться для настройки свойств модели с учетом свойств изучаемого объекта. Любая системная проблема решается на основе последовательного приближения и не имеет окончательного решения; системный подход к анализу и синтезу сложных систем состоит в упрощении сложности и ограничении разнообразия формализованного описания системы (работа исследователя) с учетом возможного проявления свойств, неопределенности состояния системы (свойства реальной системы). По В. Уткину, «...любое математическое знание начинается с набора аксиом... как семь нот октавы в музыке. А затем – подобно мелодии из семи

нот – новое здание математического знания возводится из аксиом. Но как? Никто не знает. Все определяется талантом, фантазией математика, его способностью увидеть окончательный результат». Цели науки: объяснить явления окружающего нас мира, открыть новые явления, разработать теории, которые могут быть непосредственно использованы людьми для развития новых теорий, для будущей практической деятельности. Цель научных работников – достигнуть максимального правдоподобия между научными результатами и реальными явлениями. Налицо приближенная аппроксимация: логика – для науки, эмоции – для искусства. Ученый работает с моделями реального мира или создает эти модели. Для него модели являются аксиомами, которые, в свою очередь, служат начальным пунктом на пути к новому знанию. Процессы творчества в науке и искусстве, скорее, похожи, чем принципиально различны. А вот результаты научных работников предназначены для ограниченного круга людей – экспертов в данной области. Будущее науки и мира лежит во владении сложными абстрактными (математическими) понятиями очень высокого уровня (С. Хоукинг).

Процесс исследования материала как сложной системы представляет собой организованную в соответствии с технологией системного анализа последовательность многовариантных экспериментов (в том числе вычислительных), на каждом шаге которой для исследования и поиска приемлемых решений варьируются структура и значения параметров модели. С теоретической точки зрения необходимы автоматизированная интеллектуальная технология и системная среда машинного исследования материалов как систем [10]. Фундаментальную роль играет алгоритмическое знание и методы доказательного программирования на основе регулярного применения логических уравнений в качестве основного формализма представления модели проблемной области. Методологической основой построения математических моделей сложных систем здесь является модульность структурных свойств (сложная система представляется в виде совокупности взаимодействующих элементов). Алгоритмическое знание о математических моделях, методах и методиках исследования имеет сложную иерархическую модульную структуру. При рассмотрении материалов как систем сложность подразумевается на модельном уровне; прежде всего учитывается составной характер математической модели. При компьютерном моделировании база алгоритмических знаний определяется как совокупность понятий «модель – метод – методика». Предусматривается выделение в сложной противоречивой системе функциональных подсистем на основе четкой формулировки целей по уровням. Количество целей не ограничивается – предполагается их детализация с указанием взаимосвязей по принципу деления сложной проблемы на более мелкие с количественной экспертной оценкой каждой из подпроблем по соответствующим критериям. При выборе вариантов решений из числа альтернативных (с указанием оптимальных) используются модели, отражающие все те факторы и взаимосвязи реальной ситуации, которые могли проявиться в процессе осуществления решения. Определяются классы критериев оценки относительной важности, взаимная полезность, состояние и сроки выполнения научно-исследовательских разработок, а также необходимость разумного баланса между внутренней логикой науки и ее практической значимостью (его нарушение приводит к безразличию общества к науке или потере перспективы в фундаментальных исследованиях).

Сложные иерархические структуры можно рассматривать и как набор определенным образом типологизированных элементов и связей между ними (многоуровневое представление структур). Переход с одного уровня на другой осуществляется путем выделения определенных подструктур, которые, в свою очередь, можно рассматривать в качестве макроскопических элементов. Элементы более низкого уровня могут рассматриваться как микроскопические. Тогда система при ее проектировании конфигурируется с использованием удачных типовых решений проблемы: проектирование фактически сведется к формализованному описанию часто встречающихся задач проектирования. Важнейшим на начальном этапе является адекватное моделирование рассматриваемой предметной области. Низшим уровнем представления системы

является описание ее в терминах классов (со своими атрибутами и операциями) и соответствующих им объектов, выступающих в качестве микроскопических элементов, и отношений между ними, играющих роль связей. Примером макроскопического элемента следующего уровня является системная архитектура, представляющая собой базовую подструктуру рассматриваемой системы. Высшим уровнем является интеграция отдельных систем, которые рассматриваются в качестве макроскопических элементов. Описание системы в терминах классов является низшим уровнем ее представления. При моделировании системы на уровне классов проводится дополнительная типологизация: описывается структура системы в терминах микроскопических элементов и указывается, насколько система соответствует требуемому значению функционала. Модель системы является структурированным выделением значимых при решении поставленной задачи элементов и связей.

Такой подход эффективно использовался при управлении структурой и свойствами радиационно-защитных и химически-стойких композиционных материалов [8, 9].

Качество строительных материалов оценивается как качество элемента целостной системы с учетом места в иерархической структуре надсистемы. Критерий качества подсистемы должен быть частью общего критерия качества системы, определяемого ее интегративными свойствами (организмический принцип). В основе предлагаемых методологических принципов синтеза строительных материалов лежит представление их как систем с соответствующими системными атрибутами. Системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества строительного материала, а частный – конкретной компоненты.

При синтезе строительных материалов основное внимание уделяется структурным исследованиям (строение, фазовый состав, связи, топология и др.) и функциональным (динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность и др.).

На уровне конкретного теоретического исследования основные интеллектуальные усилия направляются на структуризацию и абсолютную формализацию данного процесса. В рамках математического дисциплинарного образа наиболее важны теоретические исследования по выбору и оценке качества «наилучшей» структуры. Попытки построения полностью автоматических систем управления качеством в большинстве случаев обречены на неудачу, поскольку Человек имеет безусловный приоритет перед результатами анализа. Создание и внедрение прототипов новых систем идентификации чрезвычайно актуальны. Однако это не исключает актуальность тиражирования эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности (например, создание шкалы оценок качества материалов [11]).

В классической теории оптимального управления для решения технической задачи используется приведенная ниже последовательность этапов.

1. Техническая постановка задачи и выбор технического критерия оптимизации.

2. На основе технической постановки задачи строится математическая модель объекта управления в форме системы операторных уравнений (дифференциальных, интегральных, разностных, дифференциально-разностных, дифференциально-интегральных и т.д.). При этом математическая модель и пути ее построения зависят от степени изученности объекта, наличия опыта разработки аналогичных систем, полноты знания физических процессов, характеризующих поведение объекта, и строятся на основе теоретических исследований по изучению физических процессов в системе, логического анализа, идентификации по данным нормальной эксплуатации и т.д. Далее делается оценка области применения математических моделей. Здесь же выбираются компоненты вектора управления, параметры системы и возмущения. Устанавливаются фазовые координаты, и строится пространство состояния объекта, указываются ограничения на компоненты вектора управления. Так, ограничения на фазовые координаты (например, установление допустимого угла атаки летательного аппарата) могут дать принадлежность вектора состояния некоторому замкнутому множеству точек w -мерного пространства. Они могут определять прочность,

жесткость объекта и т.д. Здесь же указываются ограничения на вектор управления (например, энергопотребление). Определяются начальные или краевые условия, осуществляется выбор критерия для оценки качества управления.

3. В предположении *полной* формализации задачи выбирается метод оптимизации. Как правило, предполагается задание математической модели объекта применительно к выбранному методу на его языке. Однако не исключается вариант, когда модель подгоняется под выбранный метод оптимизации. Например, по системе дифференциальных уравнений линейного объекта может быть построен соответствующий функционал качества на основе корней характеристического полинома.

4. Выбор численных методов, реализующих метод оптимизации (методы решения систем дифференциальных уравнений, определения значений функционала качества и т.д.).

5. Разработка и отладка программно-алгоритмического обеспечения (в том числе корректировка численных методов для повышения точности и вычислительной эффективности алгоритма).

6. Анализ полученных результатов оптимизации с возможной корректировкой и упрощением как всей математической задачи, так и отдельных ее элементов. *Результаты решения математической задачи являются исходной информацией для уточнений формулировки технической задачи, и итерационный процесс может повторяться до достижения заданной точности.*

Практически без оговорок указанная последовательность может использоваться при *синтезе материалов* из условий получения требуемых кинетических процессов формирования физико-механических характеристик материалов (прочность, твердость, параметры тепловыделения, химическая стойкость и т.д.). Основные понятия и определения материаловедения легко интерпретируются в соответствующих терминах, принятых в теории систем управления.

Выводы

С учетом эволюции представлений о материалах проанализированы: первоначальное накопление данных, опыта и навыков в производстве нового материала (появление новой технологии); выявление закономерностей влияния различных факторов на свойства материала с привлечением фундаментальных наук (формирование новой технологии); получение строительного материала заданного уровня качества (разработка эффективной технологии); идентификация технологического процесса и построение адекватной модели «рецептурно-технологические факторы – структура – качество материала».

Предполагается существование определенных иерархических структур объектов, рассматриваемых как системы.

Выбор модели на каждом масштабном уровне определяется целями структурного описания объекта.

Обозначен сдвиг парадигм, основанных на базовых моделях непрерывной саморазвивающейся среды, в сторону парадигм, основанных на моделях структурированной саморазвивающейся среды, основанных на идеях и методах системного подхода и синергетики.

Представлены подходы к аналитическому конструированию материалов: представление материала в виде сложной системы с противоречивыми целями и критериями; оценка качества композиционных материалов; формализация кинетических процессов; управление качеством материалов; минимизация размерности критериального пространства; многокритериальная оптимизация.

Список литературы

1. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. Серия «Системы и проблемы управления» / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.

2. Прангишвили, И.В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям / И.В. Прангишвили, В.А. Потоцкий, К.С. Гинсберг, В.В. Смолянинов // Проблемы управления. – 2010. – № 4. – С. 108.
3. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
4. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
5. Абрамова, Н.А. О перспективах современной парадигмы когнитивного моделирования / Н.А. Абрамова // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – С.1858–1863.
6. Будылина, Е.А. Системный анализ: математические основы синтеза композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 30–43.
7. Будылина, Е.А. Математические задачи системного анализа при синтезе композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1 (54). – С. 71–84.
8. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P.25–32.
9. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
10. Васильев, С.Н. Интеллектуальный подход к автоматизации моделирования сложных управляемых систем / С.Н. Васильев, Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов // Труды Международной конференции RDAMM-2001. – Новосибирск, 2001. – Т. 6, Ч.2. – С.159–168.
11. Данилов, А.М. Эргатические системы: основные принципы моделирования / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Д.Д. Пырков // Научные труды КубГТУ. – 2024. – №1. – С.79–87.

References

1. Prangishvili, I.V. Systematic approach and system-wide patterns. Series «Systems and problems of management» / I.V. Prangishvili. – M.:SINTEG, 2000. – 528 p.
2. Prangishvili, I.V. Identification of systems and management problems: on the way to modern system methodologies / I.V. Prangishvili, V.A. Pototsky, K.S. Ginsberg, V.V. Smolyaninov // Problems of management. – 2010. – № 4. – P. 108.
3. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of the qualitative description and statistical reliability of the quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.
4. Korolev, E.V. Prospects for the development of construction materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.
5. Abramova, N.A. On the prospects of the modern paradigm of cognitive modeling / N.A. Abramova // Collection of proceedings of the XIII All-Russian meeting on management problems VSPU-2019. Institute of Management Problems named after. V.A. Trapeznikov RAS. – 2019. – P.1858–1863.
6. Budylna, E.A. System analysis: mathematical foundations of the synthesis of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №2 (55). – P.30–43.
7. Budylna, E.A. Mathematical problems of system analysis in the synthesis of composites / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 1 (54). – P. 71–84.

-
8. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // *Architecture and Engineering*. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P.25–32.
 9. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
 10. Vasiliev, S.N. Intelligent approach to automation of modeling of complex controlled systems / S.N. Vasiliev, G.A. Oparin, A.G. Feoktistov // *Proceedings of the International Conference RDAMM-2001*. – Novosibirsk, 2001. – Vol. 6, Part 2. – P.159–168.
 11. Danilov, A.M. Ergatic systems: basic principles of modeling / A.M. Danilov, I.A. Garkina, D.D. Pyrkov // *Scientific works of KubSTU*. – 2024. – №1. – P.79–87.

УДК 625.855.3

DOI 10.54734/20722958_2024_2_81

*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

Тарасов Роман Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru

Макарова Людмила Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru

Малашкина Светлана Александровна,
магистрант
E-mail: svetlana.diza@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

Tarasov Roman Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Management of Quality and
Technology of Construction Production»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru

Makarova Ludmila Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Management of Quality and
Technology of Construction Production»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru

Malashkina Svetlana Aleksandrovna,
Undergraduate
E-mail: svetlana.diza@yandex.ru

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова, С.А. Малашкина

Современная транспортная инфраструктура является необходимым условием эффективного развития государства. Решение задач по ее совершенствованию тесно связано с созданием безопасных и качественных автомобильных дорог. В этих условиях крайне актуально применение качественных и современных дорожных материалов. Производство таких материалов должно быть организовано в условиях непрерывного совершенствования качества продукции.

Предложена методика оценки обобщенного показателя качества производственных процессов, позволяющего прогнозировать вероятность возникновения отказа дорожного покрытия из асфальтобетонной смеси. С помощью данной методики оценки можно получить расчетное значение обобщенного показателя качества производственных процессов, сравнительный анализ которого с приемлемым значением позволяет сделать вывод о качестве готовой продукции с позиций обеспечения необходимых эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, риски, риск-ориентированный подход, воспроизводимость процесса, обобщенный показатель качества производственных процессов

RISK-ORIENTED APPROACH IN ENSURING THE QUALITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES AND ROAD SURFACES BASED ON THEIR BASIS

R.V. Tarasov, L.V. Makarova, S.A. Malashkina

Modern transport infrastructure is a necessary condition for the effective development of the state. Solving the tasks of its improvement is closely related to the creation of safe and high-quality highways. Thus the use of high-quality and modern road materials is extremely important. The production of such materials should be organized in conditions of continuous improvement of product quality.

The article proposes a methodology for evaluating a generalized indicator of the quality of production processes, which allows predicting the probability of failure of the pavement from asphalt

concrete mixture. The evaluation methodology allows us to obtain the calculated value of the generalized indicator of the quality of production processes, a comparative analysis of which with an acceptable value allows us to conclude about the quality of finished products from the standpoint of ensuring the necessary operational properties.

Keywords: asphalt concrete mixture, risks, risk-oriented approach, reproducibility of the process, generalized indicator of the quality of production processes

В современных условиях развития общества обеспечение высокого уровня безопасности дорожного движения, снижение смертности и травматизма на автомобильных дорогах является одной из приоритетных социально-экономических и демографических задач Российской Федерации.

Основной инструмент достижения этой стратегической цели – национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги», реализация которого началась в 2019 году [1, 2]. Импульс успешному развитию этого проекта дал приоритетный проект «Безопасные и качественные дороги», реализованный в 2017–2018 гг. в 36 регионах. Этот национальный проект значительно расширил географию: он стартовал в 83 субъектах Российской Федерации (за исключением Москвы и Санкт-Петербурга) и 104 городских агломерациях. Работа ведется в четырех основных направлениях: федеральные проекты «Региональная и местная дорожная сеть», «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства», «Безопасность дорожного движения», «Автомобильные дороги Минобороны России».

Одна из важнейших задач при реализации нацпроекта – использование на практике современных технологий и материалов. Срок службы новых и обновленных дорожных участков напрямую зависит от качества выполненных работ. С учетом возрастающих нагрузок на трассы должны меняться как сами принципы их проектирования, так и технологии производства дорожных покрытий. Большую роль в этом вопросе играет отказ от устаревших материалов и переход на современные решения.

Для успешного развития современных предприятий строительной индустрии необходимо обеспечить в организации эффективное функционирование системы менеджмента качества, в рамках которой осуществляются процессы, обеспечивающие:

- соответствие выпускаемой продукции требованиям нормативно-технической документации и ожиданиям потребителей на всех стадиях жизненного цикла;
- объективную и адекватную оценку качества продукции и процессов ее создания;
- непрерывное улучшение и совершенствование качества продукции и процессов производства.

Качество строительной продукции напрямую зависит от уровня организации системы контроля качества предприятий, которая включает в себя верификацию материалов и комплектующих, управление производственными процессами, контроль готовой продукции и другие, не менее важные процессы, регламентированные стандартами на системы качества.

Стремление к бездефектному изготовлению продукции связано с осуществлением целого комплекса условий. Использование на практике статистических методов дает возможность оценить протекание технологических процессов [3, 4]. Это, в свою очередь, позволяет не только обеспечить выполнение требований по основным показателям качества готовой продукции, но и уменьшить уровень брака, благодаря чему неуклонно повышается производительность труда и снижается себестоимость.

При решении этой глобальной задачи постоянного совершенствования качества продукции необходим риск-ориентированный подход в организации производственных процессов с позиций недопустимости отказа готовой продукции в процессе эксплуатации в рамках нормативного срока службы [5...8].

Применительно к управлению производственными процессами с позиций обеспечения высокого качества выпускаемой продукции целесообразно использование методики расчета обобщенного показателя качества производственного процесса, сравнительный анализ которого по сравнению с эталонным образцом дает возможность сделать вывод о качестве всего производственного цикла и прогнозировать вероятность появления отказа дорожного покрытия.

В качестве объекта исследования была выбрана асфальтобетонная смесь А16Нн. Контроль показателей качества выбранного типа смеси осуществлялся как для асфальтобетонной смеси, так и для готового дорожного покрытия. Основным показателем, характеризующим качество асфальтобетонной смеси и качество готового асфальтового покрытия, является содержание воздушных пустот.

Абсолютные значения показателей качества рассматриваемых асфальтобетонных смесей и покрытий на их основе представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Требования ГОСТ Р 58406.2–2020

Наименование показателя качества	Значение показателя качества для типа смеси	
	А16Нн	А16Вн
Содержание воздушных пустот, %:		
– для образцов, изготовленных в лаборатории	от 3,5 до 5,5	от 2,5 до 4,5
– для кернов (вырубок)	от 2,0 до 7,0	от 2,0 до 6,0

Для анализа точности и стабильности технологического процесса производства асфальтобетонной смеси были рассчитаны статистические показатели выборки (табл. 2) и построены контрольные карты (рис. 1, 2).

Т а б л и ц а 2

Статистические показатели выборки

Показатели	Смесь А16Нн	Покрытие А16Нн
Среднее значение	4,15	5,20
Стандартная ошибка	0,05	0,10
Медиана	4,19	5,70
Мода	4,19	6,00
Стандартное отклонение	0,40	1,13
Дисперсия выборки	0,16	1,28
Экссесс	1,36	-0,79
Асимметричность	-0,44	-0,70

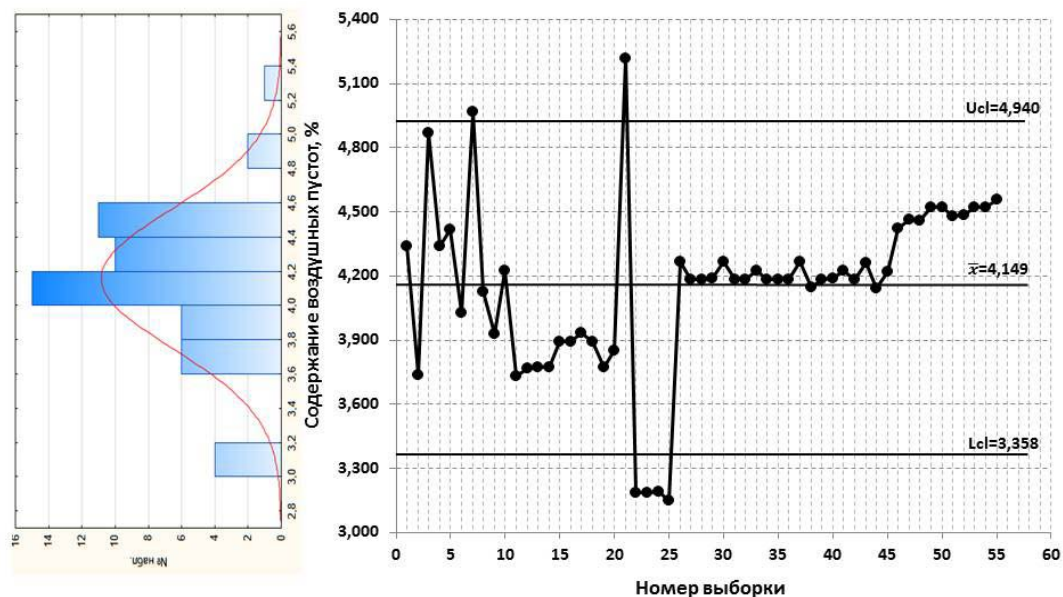


Рис. 1. Контрольная карта для асфальтобетонной смеси А16Нн

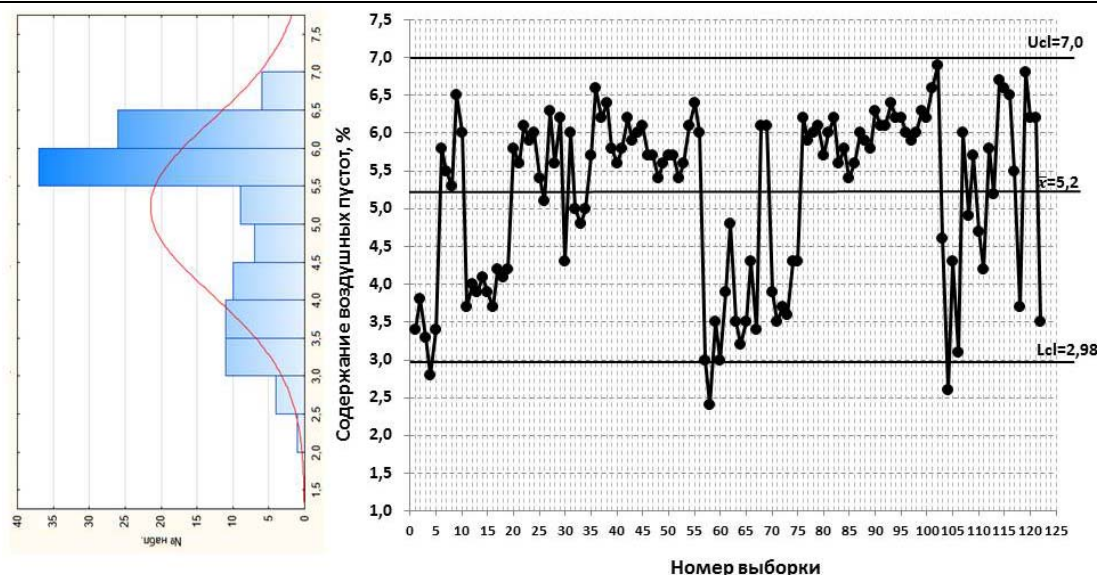


Рис. 2. Контрольная карта для покрытия из асфальтобетонной смеси А16Нн

Применительно к оценке качества производственных процессов актуальным является использование индексов воспроизводимости [9...11]. На основе статистических данных были рассчитаны индексы воспроизводимости C_{pk} [12], которые составили:

- 1) для асфальтобетонной смеси А16Нн – $C_{pk}=0,535$;
- 2) для покрытия из асфальтобетонной смеси А16Нн – $C_{pk}=0,531$.

Обобщенный показатель качества производственного процесса C предлагается рассчитывать исходя из следующих составляющих:

V_1 – критерий, который отражает годность технологического процесса и применяется при анализе воспроизводимости процесса по критериям точности и стабильности;

V_2 – критерий, характеризующий расположение точек на контрольных картах [13];

V_3 – критерий, зависящий от нормированного значения показателя качества оцениваемой продукции.

Обобщенный показатель качества производственного процесса предлагается рассчитывать как произведение $C=V_1 \cdot V_2 \cdot V_3$, где входящие сомножители оценивают в баллах с использованием табл. 3-5.

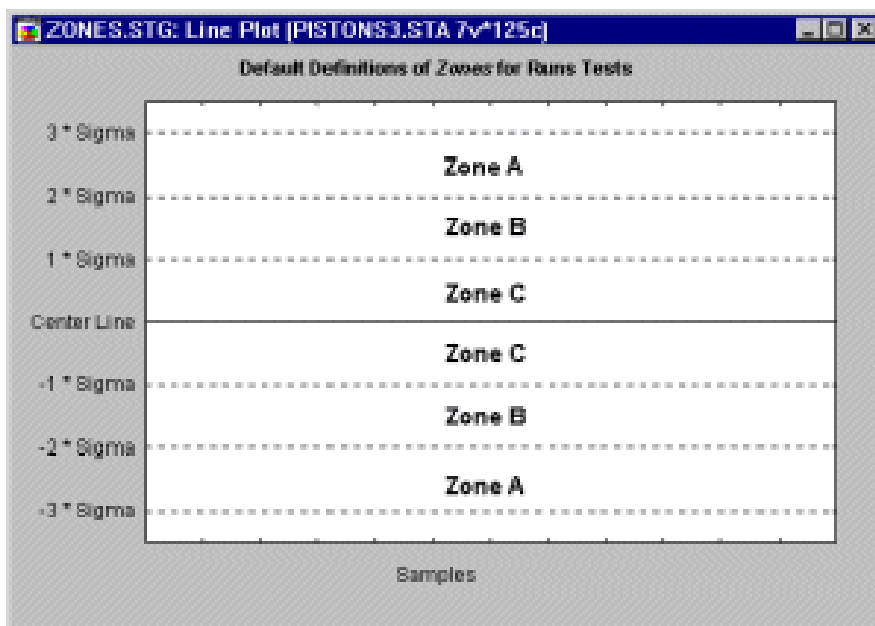
Т а б л и ц а 3

Оценки показателя годности технологического процесса в баллах V_1

Состояние технологического процесса	Показатель годности технологического процесс	Оценка вероятности отказа в баллах V_1
1	2	3
Процесс воспроизводим. Отказ практически невозможен	$C_p (C_{pk}) \geq 2,0$	1
Процесс воспроизводим. Имеется очень низкая вероятность наличия бракованной продукции в партии ($\leq 0,006$ %)	$C_p (C_{pk}) \geq 1,67$	2-3
Процесс воспроизводим. Имеется низкая вероятность наличия бракованной продукции в партии (0,006; 0,063] %	$C_p (C_{pk}) \geq 1,33$	4-5
Процесс можно признать воспроизводимым. Имеется незначительная вероятность наличия бракованной продукции в партии (0,063; 0,27] %	$C_p (C_{pk}) \geq 1$	6-7

1	2	3
Процесс не является воспроизводимым. Процент брака может варьироваться в диапазоне (0,27; 4,56] %	$C_p (C_{pk})$ варьируется в диапазоне [0,67; 1,0)	8-9
Процесс не является воспроизводимым. Процент брака выше 4,56 %	$C_p (C_{pk}) < 0,67$	10

Критерий B_2 характеризует расположение точек (выборочных данных) на контрольных картах (рис. 3, табл. 4).

Рис. 3. Зоны A , B и C

Т а б л и ц а 4

Значения критерия B_2

Критерий, характеризующий расположение точек в зонах A , B , C	Оценка в баллах B_2
Все точки, расположенные на контрольной карте, попадают в зону C	1
В зону C попадает более 80 % точек, в зоне B – не более 20 % точек, при отсутствии точек в зоне A	2
В зону C попадает [60;80] % точек, в зоне B – (20;40) %, при отсутствии точек в зоне A	3
В зону C и в зону B попадает 50 % с отклонением, не превышающим ± 10 %, при отсутствии точек в зоне A	4
В зону C попадает [20;40] % точек, в зоне B – (60;80) %, при отсутствии точек в зоне A	5
В зону C попадает [0;20) % точек, в зоне B находится 80 % и более точек, при отсутствии точек в зоне A	6
В зону C и B попадает [60;100) % точек, в зоне A – не более 40 % точек	7
В зоны C и B и в зону A попадает 50 % точек с отклонением, не превышающим ± 10 %	8
В зону C и B попадает не более 40 % точек, в зоне A – [60;100) % точек	9
Имеются точки, выходящие за границы регулирования	10

Критерий B_3 характеризуется величиной нормированного значения показателя качества оцениваемой продукции, полученной по шкале Харрингтона (рис. 4, табл. 5).

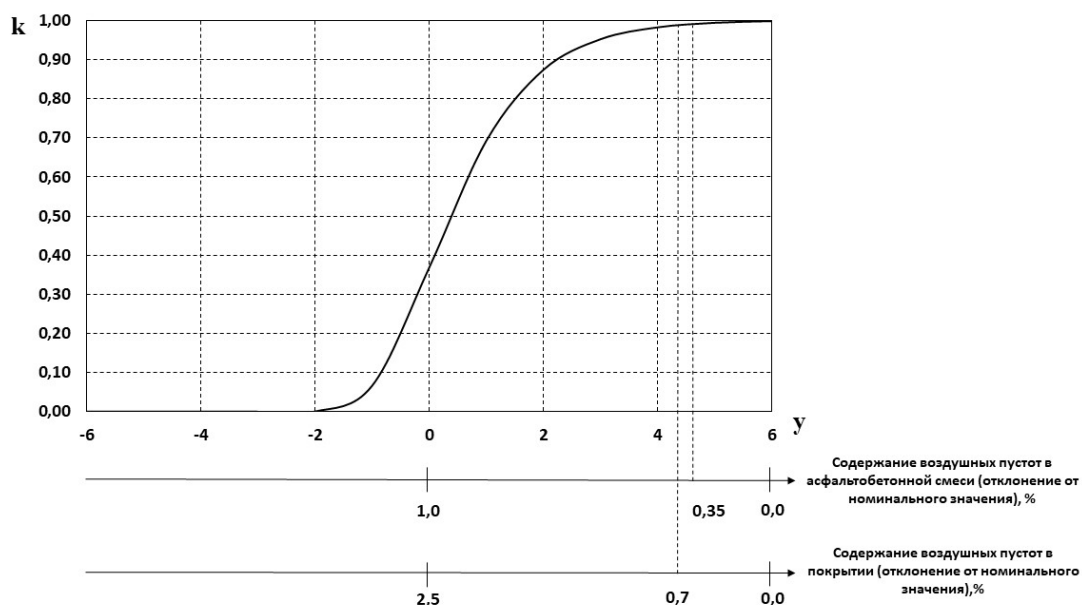


Рис. 4. Шкала желательности

Т а б л и ц а 5

Значения показателя B_3

Лингвистическая оценка показателя качества оцениваемой продукции	Нормированное значение показателя качества оцениваемой продукции	Оценка вероятности отказа в баллах
Очень высокий уровень качества	Более 0,99	1
Высокий уровень качества	От 0,90 до 0,99	2-3
Уровень качества выше среднего	От 0,80 до 0,90	4-5
Средний уровень качества	От 0,63 до 0,80	6-7
Уровень качества ниже среднего	От 0,37 до 0,63	8-9
Низкий уровень качества	Менее 0,37	10

Полученные значения обобщенного показателя качества производственного процесса составили:

- 1) для асфальтобетонной смеси А16Нн – $C=10 \cdot 10 \cdot 2=200$;
- 2) для покрытия из асфальтобетонной смеси А16Нн – $C=10 \cdot 10 \cdot 2=200$.

Применительно к любому объекту исследования существует возможность расчета приемлемого уровня обобщенного показателя качества производственных процессов. Такое значение рассчитывается с целью сравнения полученного обобщенного показателя с установленной (приемлемой) величиной.

Применительно к асфальтобетонной смеси А16Нн целесообразно установить приемлемый уровень обобщенного показателя качества производственного процесса исходя из значений $B_1=5$, $B_2=6$ и $B_3=7$. Таким образом, готовая асфальтобетонная смесь А16Нн, как и дорожное покрытие из нее, будет считаться пригодной при достижении значения не более 210.

Предлагаемая методика позволяет усовершенствовать процесс контроля качества готовой продукции за счет создания оптимальных условий организации технологического процесса производства, обеспечивающих более высокий уровень точности и уровень качества по основным показателям.

Список литературы

1. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/nacionalnyj-proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi>.
2. Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги». – URL: <https://strategy24.ru/rf/transport/projects/prioritetnyy-proyekt-bezopasnyye-i-kachestvennyye-dorogi>.
3. Логанина, В.И. Обеспечение качества и повышение конкурентоспособности строительной продукции: монография / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 176 с.
4. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях строительной индустрии: монография / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 216 с.
5. Cuthane, F. Risk to the supply of ecosystem services across aquatic ecosystems / F. Cuthane, H. Teixeira, A. Nogueira, F. Borgwardt, D. Trauner, A. Lillebo, G. Piet, M. Kuemmerlen // Science of the total environment. – 2019. – P.611–621.
6. Логанина, В.И. Статистическая оценка риска причинения вреда при несоответствии качества лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Вестник МГСУ. – 2019 – Т. 14, Вып. 11. – С.1449–1455.
7. Kuselman, Ilya. Total risk of a false decision on conformity of an alloy due to measurement uncertainty and correlation of test results / Ilya Kuselman, Francesca R da Silva Pennechi, J. Ricardo. – Talanta, 2018. – P. 666–674.
8. Taguchi, G. The Mahalanobis-Taguchi Strategy, A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.
9. Макарова, Л.В. Методический подход к обеспечению стабильности и качества технологических процессов / Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, Д.В. Тарасов, О.Ф. Петрина // Научно-теоретический журнал Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 1. – 2015. – С.120–124.
10. Шикин, Е.В. Математические методы и модели в управлении / Е.В. Шикин, А.Г. Чхатаршвили. – М.: Экономика и статистика, 2000. – 448 с.
11. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
12. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Ч. 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. – URL: <https://new.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6875089>.
13. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шухарта. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2016. – 42 с.

References

1. National project “Safe quality roads”. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/nacionalnyj-proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi>.
2. National project “Safe and high-quality roads”. – URL: <https://strategy24.ru/rf/transport/projects/prioritetnyy-proyekt-bezopasnyye-i-kachestvennyye-dorogi>.
3. Loganina, V.I. Ensuring quality and increasing the competitiveness of construction products: monograph / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov. – Penza: PGUAS, 2014. – 176 p.
4. Loganina, V.I. Quality management at enterprises of the construction industry: monograph / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: ASV Publishing House, 2008. – 216 p.
5. Cuthane, F. Risk to the supply of ecosystem services across aquatic ecosystems / F. Cuthane, H. Teixeira, A. Nogueira, F. Borgwardt, D. Trauner, A. Lillebo, G. Piet, M. Kuemmerlen // Science of the total environment. – 2019. – P.611–621.

6. Loganina, V.I. Statistical assessment of the risk of harm due to discrepancies in the quality of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Bulletin of MGSU. – 2019. – Vol. 14, Issue. 11. – P.1449–1455.
7. Kuselman, Ilya. Total risk of a false decision on conformity of an alloy due to measurement uncertainty and correlation of test results / Ilya Kuselman, Francesca R da Silva Pennechi, J. Ricardo. – Talanta, 2018. – P. 666–674.
8. Taguchi, G. The Mahalanobis-Taguchi Strategy, A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.
9. Makarova, L.V. Methodological approach to ensuring stability and quality of technological processes / L.V. Makarova, R.V. Tarasov, D.V. Tarasov, O.F. Petrina // Scientific and theoretical journal Vestnik BSTU im. V.G. Shukhova. – № 1. – 2015. – P.120–124.
10. Shikin, E.V. Mathematical methods and models in management / E.V. Shikin, A.G. Chkhatarshvili. – M.: Economics and Statistics, 2000. – 448 p.
11. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes in concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – №. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
12. GOST R ISO 22514-4-2021. Statistical methods. Process management. Part 4: Evaluation of process reproducibility and suitability. – URL: <https://new.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6875089>.
13. GOST R ISO 7870-2-2015. Statistical methods. Control cards. Part 2. Shewhart control charts. Official publication. – M.: Standartinform, 2016. – 42 p.

УДК 691.168

DOI 10.54734/20722958_2024_2_89

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

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 54-90-41; факс: (4722) 30-99-91

Выродова Кристина Сергеевна,
аспирант кафедры автомобильных
и железных дорог им. А.М. Гридчина
E-mail: vyrodova.christina@yandex.ru

Ядыкина Валентина Васильевна,
доктор технических наук,
профессор кафедры автомобильных
и железных дорог им. А.М. Гридчина
E-mail: vvya@yandex.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 54-90-41; fax: (4722) 30-99-91

Vyrodova Kristina Sergeevna,
Graduate student of the Department «Roads
and Railways named after A.M. Gridchin»
E-mail: vyrodova.christina@yandex.ru

Yadykina Valentina Vasilyevna,
Doctor of Sciences,
Professor of the Department «Roads and
Railways named after A.M. Gridchin»
E-mail: vvya@yandex.ru

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУНГИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНО- БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО И АСФАЛЬТОБЕТОНА

К.С. Выродова, В.В. Ядыкина

Использование полимерных добавок в составе битумного вяжущего является перспективным направлением в дорожной отрасли. Рассматривается применение модифицированной тонкодисперсным шунгитом полимерной добавки в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА). Установлено, что все исследуемые характеристики образцов ЩМА, приготовленных на вяжущем с использованием композита «полимер:шунгит», улучшаются в значительно большей степени по сравнению с образцами на немодифицированном полимере. Повышение прочностных характеристик асфальтобетона при 20 и 50 °С, а также прочности водонасыщенных образцов, их трещиностойкости и сдвигоустойчивости обусловлено улучшением структурирования полимерно-битумного вяжущего тонкодисперсным шунгитом, который имеет высокую удельную поверхность с развитой пористой структурой и обладает высоким адсорбционным потенциалом. Кроме того, установлено, что применение исследуемого наполнителя позволяет не только сократить содержание полимера, уменьшив себестоимость добавки, но и обеспечить оптимальный баланс механических свойств самого композита. Таким образом, доказана целесообразность использования полимерного композита, наполненного шунгитом, в составе вяжущего для повышения качества щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Ключевые слова: щебеночно-мастичный асфальтобетон, битумное вяжущее, полимер, шунгит, физико-химические свойства вяжущего

The work was carried out as part of the implementation of the federal university support program "Priority-2030" using equipment based on the Center for High Technologies of V.G. Shukhov BSTU.

THE USE OF SHUNGITE TO IMPROVE THE QUALITY OF POLYMER-BITUMEN BINDER AND ASPHALT CONCRETE

K.S. Vyrodova, V.V. Yadykina

The use of polymer additives in the composition of bitumen binder is a promising direction in the road industry. The article discusses the use of a polymer additive modified with finely dispersed shungite in the composition of crushed stone-mastic asphalt concrete (SHMA). It has been found that

all the studied characteristics of the plasma samples prepared on a binder using the polymer:shungite composite are improved to a much greater extent compared with samples on an unmodified polymer. The increase in the strength characteristics of asphalt concrete at 20 and 50 C, as well as the strength of water-saturated samples, their crack resistance and shear resistance is due to improved structuring of polymer-bitumen binder with finely dispersed shungite, which has a high specific surface area with a developed porous structure and has a high adsorption potential. In addition, it has been found that the use of the studied filler allows not only to reduce the polymer content, reducing the cost of the additive, but also provides an optimal balance of the mechanical properties of the composite itself. Thus, the expediency of using a polymer composite filled with shungite as part of a binder to improve the quality of crushed stone-mastic asphalt concrete has been proved.

Keywords: crushed stone-mastic asphalt concrete, bitumen binder, polymer, shungite, physico-chemical properties of the binder

Введение. Использование полимерно-битумного вяжущего в составе асфальтобетонной смеси актуально во всем мире. Введение полимера в вяжущее существенно расширяет срок службы автомобильных дорог в регионах с большим перепадом температур и повышенной нагрузкой на дорожное полотно [1–3].

Для повышения физико-химических свойств битумного вяжущего достаточно часто используют полимеры класса эластомеров. Стирол-бутадиен-стирольный каучук при модифицировании им битума создает трехмерную сетку, внутри которой равномерно распределен битум в виде мельчайших дисперсий, что и позволяет сделать вяжущее более мягким и гибким при низких температурах и более вязким при высоких температурах [4–6]. Придание вяжущему высокоэластичных свойств позволяет в дальнейшем уменьшить колебание дорожного полотна, образующееся под высокой нагрузкой транспортных средств [7].

Известно, что совершенствовать свойства полимеров, использующихся в различных отраслях промышленности, можно путем их модифицирования тонкодисперсными добавками [8–9]. Компаундирование полимера, например, с активными наполнителями позволяет не только сократить содержание полимера, уменьшив его высокую стоимость, но и обеспечить оптимальный баланс эксплуатационных свойств композита. Среди дисперсных наполнителей полимерных композитов можно рассмотреть тонкодисперсный шунгит, который представляет собой углеродистую породу в кристаллической фазе, состоит более чем на 90 % из углерода, т.е. является переходным материалом от углерода к графиту. Помимо уникального состава шунгит обладает повышенной активностью, высокой химической стойкостью и дифильностью (одновременно является гидрофобным и гидрофильным веществом), может смешиваться практически со всеми органическими и неорганическими веществами [10–12].

В работах [13–18] представлены результаты исследований, в которых изучалось изменение физико-механических свойств каучуковых композитов, наполненных шунгитом, применяемых для получения изделий различного назначения. Наиболее результативно использование шунгита в рецептурах резино-технических изделий на основе синтетических бутадиен-стирольных каучуков. Введение шунгита не только не ухудшает свойства полимеров, но и повышает их тепло- и термостойкость, стойкость к окислению за счет высокой концентрации парамагнитных центров, которая обуславливает повышенную активность шунгита в окислительно-восстановительных реакциях. Имеется также опыт использования шунгита в составе полимерно-битумных композиций [19–21].

Материалы и методы исследований. Исследовались образцы ЩМА-20, полученные на основе битума, модифицированного каучукошунгитовой композицией, полученной в Российском технологическом университете (РТУ МИРЭА) на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30 (производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук») и тонкодисперсного шунгита – Карелита (предоставлен Карельской инвестиционной компанией «РБК»).

Для изучения влияния битумно-каучуковых вяжущих (БКВ), содержащих шунгит, на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона была использована каучукошунгитовая композиция с соотношением компонентов 100:50, а также БКВ без шунгита.

Исходя из опыта предыдущих исследований [19-20] по влиянию композиции «каучук:шунгит» при различных соотношениях компонентов на свойства вяжущего следует, что наиболее эффективной оказалась именно эта композиция.

В качестве исходного вяжущего в работе использовался битум вязкий дорожный марки БНД 100/130, физико-химические характеристики которого представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Физико-химические характеристики битума БНД 100/130

Показатель	Нормативные требования по ГОСТ 33133-2014 для БНД 100/130	Фактические данные	Метод испытания
Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм	101-130	103	ГОСТ 33136
Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм	Не менее 30	35	ГОСТ 33136
Температура размягчения по кольцу и шару, °C	Не менее 45	45	ГОСТ 33142
Температура хрупкости по Фраасу, °C	Не выше -20	- 20,5	ГОСТ 33143
Растяжимость при 25°C, см	Не менее 70	Более 150	ГОСТ 33138
Растяжимость при 0°C, см	Не менее 4	4,5	ГОСТ 33138

Для оценки эффективности применения в составе ЩМА вяжущего, модифицированного композицией «каучук:шунгит», были исследованы образцы ЩМА на исходном битуме БНД 100/130 (состав №1), битумно-каучуковом вяжущем (состав № 2), содержащем 5 % каучука, и вяжущем, содержащем 7 и 9 % композита «каучук:шунгит» (составы 3-4) в соотношении 100:50 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Сведения о добавках и составах БКВ

Вид добавки	БНД 100/130, без добавки	Каучук СКС-30, без шунгита	Композит «каучук:шунгит» при соотношении 100:50	
№ состава	1	2	3	4
Концентрация добавки от массы битума, %	-	5	7	9
Содержание полимера СКС-30 от массы битума, %	-	5	4,6	6
Содержание шунгита, %	-	-	2,4	3

Использование указанных количеств каучука и каучукошунгитовых композиций соответствует наиболее часто применяемым концентрациям каучука в составе БКВ. Количество шунгита в составе вяжущего при этом было в два раза меньше, чем каучука (составы 3-4).

Приготовление составов БКВ осуществлялось с помощью лабораторной мешалки Silverson L5T. В емкость с обезвоженным и разогретым до температуры 120 °C битумом подавался измельченный композит «каучук:шунгит» в необходимом количестве. Далее смесь перемешивалась с постепенным увеличением температуры до 160 °C в течение нескольких часов, при этом скорость перемешивания снижалась. После этого смесь помещалась в сушильный шкаф при температуре 160 °C для созревания. Однородность БКВ определялась визуально с помощью стеклянной палочки.

В полученных таким образом составах исследовались физико-химические свойства битума и битумно-каучуковых вяжущих в соответствии с ГОСТ 22245-90, а также адгезия вяжущего к щебню по ГОСТ 12801-98.

Был произведен подбор зернового состава ЦМА. В качестве минеральных материалов, применяемых в составе смеси, использовали гранитный щебень Павловского месторождения двух фракций: 5-10 и 5-20, отсев дробления гранита, известняковый минеральный порошок производства ООО «Белдорстрой» и стабилизирующую добавку Viator 66. В табл. 3 представлено процентное содержание компонентов состава ЦМА-20.

Т а б л и ц а 3

Состав ЦМА-20

Материалы	Процентное содержание
Щебень 5-20	65,42
Щебень 5-10	10,65
Отсев	12
Минеральный порошок	11,93
Viator-66	0,43
Битумно-каучуковое вяжущее (сверх 100 %)	4,99

Для определения характеристик образцов ЦМА был произведен цикл испытаний по стандартным методикам ГОСТ 12801-98.

Результаты исследования. Начальным этапом исследования явилось проведение лабораторных испытаний физико-химических свойств полученного битумно-каучукового вяжущего, а именно определение глубины проникания иглы, температуры размягчения и хрупкости, растяжимости и эластичности (см. табл. 4 и рис. 2–3).

В табл. 4 приведены результаты влияния исследуемых составов (см. табл. 1) на пенетрацию при температуре при 25 и 0 °C и растяжимость.

Т а б л и ц а 4

Влияние каучука и композита «каучук:шунгит» на пенетрацию и растяжимость вяжущего

Показатели	Номера составов			
	1	2	3	4
Глубина проникания иглы при 25 °C, мм	107	51	45	44
Глубина проникания иглы при 0 °C, мм	41	27	19	17
Растяжимость при 25 °C, см	127	150	148	150
Растяжимость при 0 °C, см	6	16	15	17

Результаты свидетельствуют о том, что пенетрация при 25 и 0 °C при введении в битум каучука и композиций (составы № 2 и 3-4 соответственно) закономерно падает по сравнению с исходным битумом (состав № 1).

Введение шунгита в состав вяжущего (составы № 3-4) оказывает значительно большее влияние на пенетрацию, чем введение ненаполненного шунгитом каучука (состав № 2). Следует отметить, что состав № 3 содержит меньшее количество полимера по сравнению с каучуковым вяжущим, немодифицированным шунгитом (состав № 2), что экономически выгодно. Влияние исследуемых добавок на растяжимость вяжущего также показало увеличение показателя как при 25 °C, так и при 0 °C.

В целом показатели пенетрации БКВ полностью отвечают требованиям к БКВ 30/40 в соответствии с ТУ 5718-004-03443057-98. Повышение вязкости должно положительно отразиться на эксплуатационных характеристиках щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Результаты исследований по влиянию каучука и композита «каучук:шунгит» на температуру размягчения и хрупкости представлены на рис. 1.

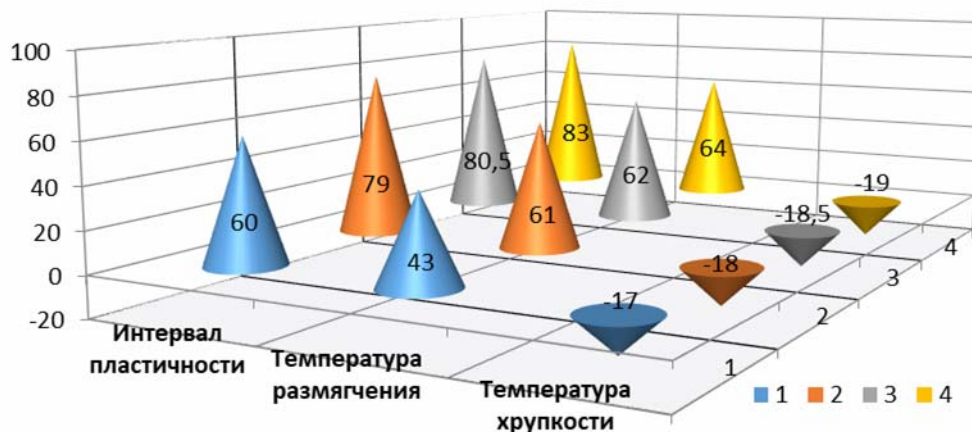


Рис. 1. Влияние исходного каучука СКС-30 и композита «каучук:шунгит» на температуру размягчения, температуру хрупкости вяжущего и интервал пластичности

Из результатов видно, что введение каучука и композита, наполненного шунгитом, на 18-21°C повышает температуру размягчения битума – с 43 до 61-64°C. При этом более высокие показатели температуры размягчения наблюдаются при использовании композиции «каучук:шунгит». Введение 7 и 9 % исследуемого композита (составы № 3 и 4) повысило показатель по сравнению с исходным битумом на 44-48 %. При этом в составе № 3 содержание полимера на 8 % меньше, чем в составе № 2.

Изменение температуры хрупкости при введении указанных добавок варьируется в пределах 3 – 4°C, что на 20-26 % ниже температуры хрупкости исходного БНД 100/130. Интервал пластичности исследуемых добавок значительно увеличился. Следовательно, ЩМА, приготовленный на основе вяжущего с использованием композита «каучук:шунгит», будет эффективнее воспринимать нагрузку в большем температурном диапазоне, не вызывая пластические деформации, но при этом не переходя в хрупкое состояние.

Одним из наиболее значимых показателей БКВ и ПБВ является эластичность, обуславливающая способность дорожного покрытия восстанавливаться после воздействия сдвиговых усилий на дорогах с интенсивным движением.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемые составы придают вяжущим эластичность как при 25 °С, так и при 0 °С. Показатели эластичности составляют 40-45 % при 0 °С и 49-55 % при 25 °С. Причем введение шунгита незначительно влияет на эту характеристику.

Важным показателем эффективности введения шунгита является получение вяжущего с высокими адгезионными свойствами, обеспечивающими прочное и устойчивое сцепление с поверхностью минеральных материалов.

В данной работе показатель сцепления битума со щебнем определяли методом визуальной оценки степени сохранности пленки битумного вяжущего на гранитном щебне после его кипячения в дистиллированной воде. На рис. 2 представлены фотографии адгезии испытываемых образцов к гранитному щебню.

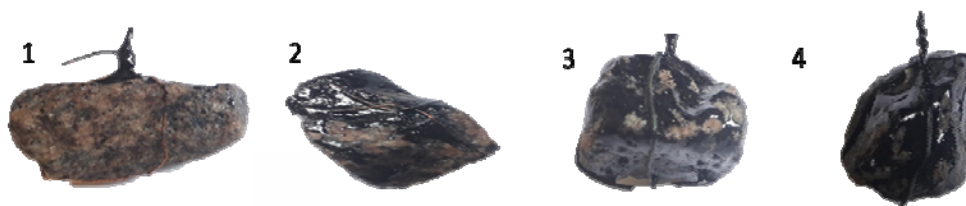


Рис. 2. Адгезия испытываемых образцов к гранитному щебню:
1, 2, 3, 4 – номера составов

Из фотографий видно, что исходный битум и битумно-каучуковое вяжущее имеют более слабую адгезию, а сцепление образца на основе каучука и шунгита значительно лучше за счет активных функциональных групп шунгита. Этот факт положительно отразится на показателе водостойкости при длительном водонасыщении ЦМА.

В результате проведенных лабораторных испытаний установлено, что наполнение каучука шунгитом привело к увеличению вязкости, температуры размягчения, эластичности вяжущего. Это дает основание предполагать, что использование исследуемых добавок окажет положительное влияние на характеристики асфальтобетона.

Как и следовало ожидать, введение в состав вяжущего для производства щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМАС) каучука и каучукошунгитовой композиции улучшает практически все характеристики ЦМА (табл. 5-6 и рис. 3).

В табл. 5 приведены результаты испытаний образцов ЦМА. Из результатов видно, что введение всех добавок в битум (составы № 2-4) оказало положительное влияние на основные прочностные характеристики (R_{20} , R_n , R_{50}) асфальтобетонной смеси по сравнению с образцами состава № 1 на исходном битуме БНД 100/130.

Т а б л и ц а 5

Физико-механические характеристики образцов ЦМА

Наименование показателей	Номера составов			
	1	2	3	4
R_{20} , МПа	2,83	3,77	4,09	4,23
R_n , МПа	2,4	3,28	3,72	3,9
R_{50} , МПа	0,97	1,1	1,23	1,28
Длительная водостойкость, %	0,84	0,87	0,89	0,92

Установлено существенное увеличение прочности при 20 и 50 °С, а также прочности водонасыщенных образцов. Так, предел прочности образцов ЦМА на сжатие при 20 °С при использовании в качестве добавки каучука СКС-30 возрастает на 33,2 %, а при введении каучукошунгитовых композиций в количестве 7 и 9 % – на 44,52 и 49,47 % соответственно, по сравнению с образцами ЦМА на исходном битуме. Это вполне закономерно и связано с улучшением характеристик битума за счет его структурирования шунгитом (см. табл. 2 и рис. 1-2). Следует отметить, что показатели прочности при 20 °С образцов на каучукошунгитовых вяжущих превышают требования ГОСТ 31015-2002 (не менее 2,2 МПа) на 85,9 и 92,3 %.

При испытании образцов при температуре 50 °С наблюдается несколько меньший прирост прочности (12-16 %), однако при использовании каучукошунгитовых композиций нормативные требования превышены более чем в 2 раза (требования по ГОСТ – 0,65 МПа).

С учетом возможности замены части дорогостоящего полимера, в данном случае каучука СКС-30, на шунгит производилось сравнение показателей образцов № 3 и 4, содержащих шунгит (2,4 % и 3 %) и каучук в концентрации 4,6 и 6 % соответственно, с образцом № 2, в котором отсутствовал шунгит и содержалось 5 % каучука. Введение каучукошунгитовых композиций привело не только к получению асфальтобетона без потери качества, но и к увеличению прочностных свойств ЦМА.

Установлено также, что при повышении концентрации композита до 9 % достаточно сильно растут все показатели по сравнению с меньшей концентрацией композита (7 %) в составе ЦМА.

Однако, испытав образцы на водонасыщение, обнаружили, что результаты состава № 4 вышли за пределы требований ГОСТ 31015-2002 по водонасыщению (табл. 6). Это объясняется тем, что данный состав имеет большее содержание шунгита, который обладает достаточно высокой пористостью.

Водонасыщение и пористость образцов ЦМА

Наименование показателей	Ед. изм.	Треб ГОСТ 31015-2002	Каучук СКС-30	«каучук:шунгит» (100:50), концентрация, %	
			5	7	9
			Номера составов		
			2	3	4
Водонасыщение	%	1-4	3,67	3,89	4,16

После водонасыщения образцов также наблюдается увеличение прочности: например, при использовании 9 % композита (состав № 4), увеличение достигает 62,5 % по сравнению с результатами на исходном битуме (состав № 1), что обусловлено повышением сцепления БКВ с минеральными составляющими ЦМА, за счет этого длительная водостойкость образцов ЦМА при использовании композиции «каучук:шунгит» достигает значений 0,89 и 0,92 при требовании ГОСТ 31015-2002 – 0,85.

На рис. 3 представлены результаты по трещиностойкости при 0 °С и сдвигоустойчивости при 50 °С. Данные показатели характеризуют работоспособность дорожного покрытия при низких температурах в холодное время года и при высоких температурах в теплый период.

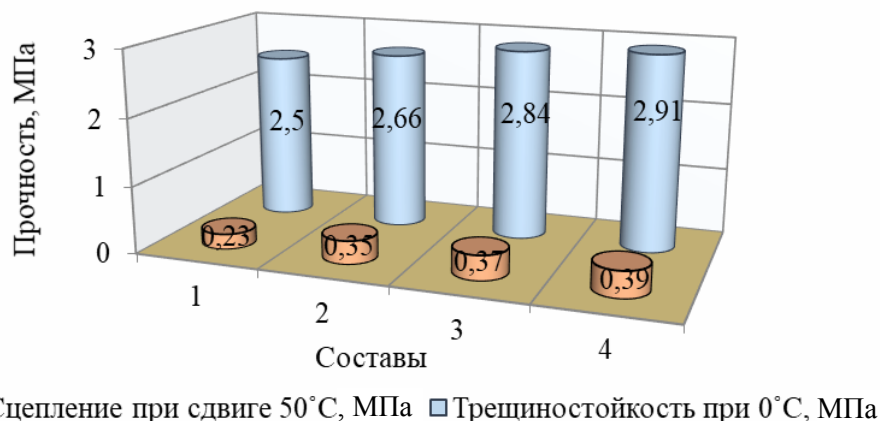


Рис. 3. Результаты устойчивости образцов ЦМА при низких и высоких температурах

Показатель трещиностойкости ЦМА оценивали по прочности на растяжение при расколе при 0 °С, которая характеризует сопротивление растягивающим силовым воздействиям в холодное время года. При введении исследуемых добавок результат увеличился на 6,4-16,4 %, что в основном определяется степенью структурирования полимерно-битумного вяжущего.

Получение асфальтобетона требуемой сдвигоустойчивости возможно путем достижения определенной величины внутреннего трения и обеспечения соответствующего сцепления системы. Исследуемые составы оказали значительное влияние на данный показатель. Так, результаты сцепления при сдвиге образцов на основе каучука без шунгита выросли на 52,2 % по сравнению с исходным битумом, а при использовании 7 и 9 % композиции – на 60,87 и 69,6 %. Коэффициент внутреннего трения всех составов равен 0,94.

Таким образом, введение 7 % композита, содержащего шунгит, является наиболее рациональным. Поскольку в состав БКВ, содержащий 7 % композита (состав № 3), входит 4,6 % каучука вместо 5 % его содержания в составе № 2, общая экономия каучука составляет 8 %, причем все свойства ЦМА не только остаются на уровне состава № 2 без шунгита, но и несколько улучшаются. Дальнейшее увеличение количества композита до 9 % нецелесообразно из-за повышения пористости и водонасыщения ЦМА, а также из-за повышенного расхода полимера.

Улучшение всех характеристик вяжущего и асфальтобетона, приготовленного на основе композита, наполненного шунгитом, обусловлено его сильным структурирующим воздействием. Этот эффект связан не только с высокой удельной поверхностью шунгита, но и с очень развитой внутренней поверхностью зерен, образуемой разветвленной системой микропор, которые отличаются высоким адсорбционным потенциалом. За счет этого значительная часть поверхностно-активных компонентов битума сорбируется на их поверхности, оказывая более выраженное структурирующее воздействие на вяжущее по сравнению с полимером без шунгита [21].

Выводы. Применение каучука, наполненного шунгитом, в составе вяжущего привело к повышению температуры размягчения битума, интервала пластичности, увеличению эластичности и растяжимости, особенно при 0 °С (в 2-3 раза по сравнению с исходным битумом), что должно положительно отразиться на деформативной устойчивости дорожного покрытия.

Установлено положительное влияние шунгита в составе полимера на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона: прочность при 20 °С и при 50 °С, а также прочность водонасыщенных образцов, трещиностойкость при 0 °С и сцепление при сдвиге при 50 °С. Характеристики образцов ЦМА, приготовленных на вяжущем с использованием композита «полимер:шунгит», улучшаются в значительно большей степени по сравнению с образцами на немодифицированном полимере. Это связано со структурирующим влиянием шунгита и повышением адгезионных свойств модифицированной полимерной композиции, используемой в составе щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения композита «полимер:шунгит» в составе вяжущего при производстве щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси. При этом модифицированный шунгитом композит не только повышает физико-механические свойства асфальтобетона, но и позволяет существенно (на 8 %) сократить расход дорогостоящего полимера без потери качества ЦМА.

Список литературы

1. Лазарева, Т.Л. Выбор полимерного модификатора с целью получения полимерно-битумного вяжущего для дорожных покрытий Дальнего Востока / Т.Л. Лазарева, Н.И. Ярмолинская // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса. – 2017. – № 1. – С. 70–74.
2. Жабцев, А.В. Анализ влияния полимерно-битумных вяжущих на свойства дорожных битумов / А.В. Жабцев, А.С. Строкин // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2022. – № 1. – С. 12–17.
3. Хафизов, Э.Р. Исследование физико-механических свойств многощебенистых асфальтобетонов на основе полимерно-битумных вяжущих / Э.Р. Хафизов, Е.А. Вдовин, А. Ю. Фомин, О. Н. Ильина // Известия КГАСУ. – 2016. – №1. – С. 211–215.
4. Печеный, Б.Г. Влияние эластомеров на свойства битумополимерных покрытий на различных поверхностях / Б.Г. Печеный, В.Л. Курбатов // Университетская наука. – 2018. – № 2 (6). – С. 51–57.
5. Гавер, С.В. Влияние совместимости нефтяных битумов и стирол-бутадиен-стирольных полимеров на дисперсность и эксплуатационные характеристики полимерно-битумных композиций / С. В. Гавер, Ю.А. Урчева, А.М. Сыроежко, В.В. Васильев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2016. – № 36 (62). – С. 68–71.
6. Калгин, Ю.И. Дорожные битумо-минеральные материалы на основе модифицированных битумов: монография / Ю.И. Калгин. – Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2006. – 271 с.
7. Князев, Ю.В. Использование полимерных материалов для модификации дорожного вяжущего / Ю.В. Князев, В.В. Буданцев, В.А. Фролов, С.А. Меркулов // Молодой ученый. – 2015. – № 12 (92). – С. 198–200.

8. Кахраманов, Н.Т. Наноструктурированные композиты и полимерное материаловедение / Н.Т. Кахраманов, А.Г. Азизов, В.С. Осипчик, У.М. Мамедли, Н.Б. Арзум // Пластические массы. – 2016. – №1(2). – С. 49–57.
9. Колосова, А.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов / А.С. Колосова, М.К. Сокольская, И.А. Виткалова, А.С. Торлова, Е.С. Пикалов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10 (3). – С. 459–465.
10. Гришин, Б.С. Тонкодисперсные шунгитовые порошки – перспективный наполнитель полифункционального действия для эластомерных композитов / Б.С. Гришин, Ю.К. Калинин. – Петрозаводск, 2005. – 19 с.
11. Дейнес, Ю.Е. Шунгиты – от научных знаний к инновациям / Ю.Е. Дейнес, А.В. Первунина, В.В. Ковалевский // Труды Карельского научного центра Российской академии наук Научная конференция «Шунгит-2020-2021» (Петрозаводск, 29 июня – 1 июля 2021 г.). – 2021. – № 10. – С. 103–105.
12. Гурова, М.В. Шунгит – материал с уникальными свойствами / М.В. Гурова, В.Ю. Амелин, В.В. Фоминов, В.М. Кретова // Инновации в строительстве глазами молодых специалистов: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. – 2014. – С. 112–115.
13. Каблов, В.Ф. Исследование влияния активированного шунгита на свойства эластомерных композиций на основе СКЭПТ / В.Ф. Каблов, О.М. Новопольцева, В.Г. Кочетков, И.В. Тумашик // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 5 (228). – С. 124–127.
14. Барашкова, И.И. Межфазные слои на границе шунгит-эластомер / И.И. Барашкова, Н.Н. Комова, М.В. Мотякин, Е.Э. Потапов, А.М. Вассерман // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 456, № 4. – С. 437–439.
15. Петрова, Е.П. Разработка и создание рецептуры резинотехнических изделий с улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками с использованием шунгита / Е.П. Петрова, Н.А. Рахимова // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 2. – С. 36–38.
16. Корнев, Ю.В. Особенности релаксационных свойств эластомерных композитов, наполненных нанодисперсным шунгитом / Ю.В. Корнев, А.А. Соколовский, Ю.В. Лищер, Д.В. Гуськов // Сборник трудов конференций «Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов». – М., 2016. – С. 295–303.
17. Чиркунова, С.В. Нанодисперсный минерал шунгит как новый эффективный наполнитель для эластомерных материалов на основе каучуков специального назначения / С.В. Чиркунова, Ю.Г. Яновский, Ю.В. Корнеев, О.В. Бойко // XXVI Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов. – М., 2015. – С. 66–70.
18. Ключникова, Н.В. Влияние шунгита на эксплуатационные свойства полимерного композиционного материала / Н.В. Ключникова, А.О. Пискарева, К.А. Урванов, С.А. Гордеев, И. Генов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 2. – С. 96–105.
19. Сорокина, О.В. Исследование свойств высоконаполненных композитов на основе битума и шунгита (Карелита) / О.В. Сорокина, Е.Э. Потапов, С.В. Резниченко, А.П. Бобров, В.А. Смаль, В.В. Ядыкина, И.В. Тикунова // Каучук и резина. – 2018. – № 2(77). – С. 92–94.
20. Yadykina, V.V. Study of the impact of the composite “rubber:shungite” on the properties of bituminous rubber binder / V.V. Yadykina, K.S. Vyrodova, E.E. Potapov. // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 151. – P. 302–308.
21. Выродова, К.С. Изменение свойств дорожного битума под влиянием каучуко-шунгитового композита / К.С. Выродова, О.А. Михайлова // Сборник Национальной конференции с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова». – 2021. – С. 1933–1938.

22. Черноусов, Д.И. Обоснование возможности применения минерального порошка из шунгита в асфальтобетонных смесях / Д.И. Черноусов, С.Е. Щербинина // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 2. – С. 34–35.

References

1. Lazareva, T.L. The choice of a polymer modifier for the purpose of obtaining a polymer bitumen binder for road surfaces of the Far East / T.L. Lazareva, N.I. Yarmolinskaya // The Far East: problems of the development of the architectural, construction and road transport complex. – 2017. – № 1. – P. 70–74.
2. Zhabtsev, A.V. Analysis of the influence of polymer-bitumen binders on the properties of road bitumen / A.V. Zhabtsev, A.S. Strokin // High technologies in the construction complex. – 2022. – No. 1. – P. 12–17.
3. Hafizov, E.R. Investigation of the physico-mechanical properties of multi-crushed asphalt concrete based on polymer-bitumen binders / E.R. Hafizov, E.A. Vdovin, A.Yu. Fomin, O.N. Ilyina // Izvestiya KGASU. – 2016. – No. 1. – P. 211–215.
4. Pechenyi, B.G. The effect of elastomers on the properties of bitumen polymer coatings on various surfaces / B.G. Pechenyi, V.L. Kurbatov // University Science. – 2018. – № 2 (6). – P. 51–57.
5. Haver, S.V. The influence of compatibility of petroleum bitumen and styrene-butadiene-styrene polymers on the dispersion and performance characteristics of polymer-bitumen compositions / S.V. Haver, Yu.A. Urcheva, A.M. Syroezhko, V.V. Vasiliev // Izvestiya St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). – 2016. – No. 36 (62). – P. 68–71.
6. Kalgin, Yu.I. Road bitumen-mineral materials based on modified bitumen: monograph / Yu.I. Kalgin. – Voronezh: Publishing House: Voronezh State University, 2006. – 271 p.
7. Knyazev, Yu.V. The use of polymer materials for modification of road binder / Yu.V. Knyazev, V.V. Budantsev, V.A. Frolov, S.A. Merkulov // Young Scientist. – 2015. – № 12 (92). – P. 198–200.
8. Kakhramanov, N.T. Nanostructured composites and polymer materials science / N.T. Kakhramanov, A.G. Azizov, V.S. Osipchik, U.M. Mammadli, N. B. Arzum // Plastic masses. – 2016. – №1(2). – P. 49–57.
9. Kolosova, A.S. Fillers for modification of modern polymer composite materials / A.S. Kolosova, M.K. Sokolskaya, I.A. Vitkalova, A.S. Torlova, E.S. Pikalov // Fundamental research. – 2017. – № 10 (3). – P. 459–465.
10. Grishin, B.S. Finely dispersed shungite powders – a promising filler of multifunctional action for elastomeric composites / B.S. Grishin, Yu.K. Kalinin. – Petrozavodsk, 2005. – 19 p.
11. Deines, Yu.E. Shungites – from scientific knowledge to innovation / Yu.E. Deines, A.V. Pervunina, V.V. Kovalevsky // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Scientific conference «Shungite-2020-2021» (Petrozavodsk, June 29 – July 1, 2021). – 2021. – No. 10. – P. 103–105.
12. Gurova, M.V. Shungite – a material with unique properties / M.V. Gurova, V.Yu. Amelin, V.V. Fominov, V.M. Kretova // Innovations in construction through the eyes of young professionals: Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference. – 2014. – P. 112–115.
13. Kablov, V.F. Investigation of the effect of activated shungite on the properties of elastomeric compositions based on SKEPT / V.F. Kablov, O.M. Novopol'tseva, V.G. Kochetkov, I.V. Tumashik // Izvestiya Volgograd State Technical University. – 2019. – № 5 (228). – P. 124–127.
14. Barashkova, I.I. Interfacial layers at the shungite-elastomer boundary / I.I. Barashkova, N.N. Komova, M.V. Motyakin, E.E. Potapov, A.M. Wasserman // Reports of the Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 456, No. 4. – P. 437–439.

15. Petrova, E.P. Development and creation of a formulation for rubber products with improved operational and environmental characteristics using shungite / E.P. Petrova, N.A. Rakhimova // *Modern scientific research and innovation*. – 2016. – No. 2. – P. 36–38.
16. Kornev, Yu.V. Features of relaxation properties of elastomeric composites filled with nanodisperse shungite / Yu.V. Kornev, A.A. Sokolovsky, Yu.V. Lischer, D.V. Guskov // *Proceedings of conferences «Problems of tires, rubber products and elastomeric composites»*. – M., 2016. – P. 295–303.
17. Chirkunova, S.V. Nanodisperse mineral shungite as a new effective filler for elastomeric materials based on special purpose rubbers / S.V. Chirkunova, Yu.G. Yanovsky, Yu.V. Korneev, O.V. Boyko // *XXVI International Innovation-oriented Conference of Young scientists and students*. – M., 2015. – P. 66–70.
18. Klyuchnikova, N.V. The influence of shungite on the operational properties of a polymer composite material / N.V. Klyuchnikova, A.O. Piskareva, K.A. Urvanov, S.A. Gordeev, I. Genov // *Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2020. – No. 2. – P. 96–105.
19. Sorokina, O.V. Investigation of the properties of highly filled composites based on bitumen and shungite (Karelite) / O.V. Sorokina, E.E. Potapov, S.V. Reznichenko, A.P. Bobrov, V.A. Smal, V.V. Yadykina, I.V. Tikunova // *Rubber and rubber*. – 2018. – № 2(77). – P. 92–94.
20. Yadykina, V.V. Study of the impact of the composite “rubber:shungite» on the properties of bituminous rubber binder / V.V. Yadykina, K.S. Vyrodova, E.E. Potapov // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 151. – P. 302–308.
21. Vyrodova, K.S. Changing the properties of road bitumen under the influence of a rubber-shungite composite / K.S. Vyrodova, O.A. Mikhailova // *In the collection of the National Conference with international participation «International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU»*. – 2021. – P. 1933–1938.
22. Chernousov, D.I. Substantiation of the possibility of using mineral powder from shungite in asphalt concrete mixtures / D.I. Chernousov, S.E. Shcherbinina // *Science and technology in the road industry*. – 2009. – No. 2. – P. 34–35.

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

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Science, Professor, Head of the
Department «Building materials and
woodworking technology»

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate

ЭПОКСИДНЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЕТОНА И РЕМОНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров

Описана методика оценки качества эпоксидных компаундов, применяемых для защиты и ремонта бетонных конструкций. Приведены результаты механических испытаний получаемых композитов. Посредством термометрии произведена оценка тепловыделения при твердении компаундов. Установлена зависимость предельной температуры от соотношения компонентов матричной части композитного материала и степени наполнения минеральным порошком. Представлены результаты численного моделирования процесса рассеивания тепла при твердении эпоксидных композитов. По результатам испытаний определено рациональное соотношение компонентов при приготовлении ремонтных составов.

Ключевые слова: конструкционные материалы, композиционные материалы, эпоксидная смола, термометрия, механические испытания, ремонт конструкций, дефекты железобетонных конструкций

EPOXY COMPOUNDS FOR CONCRETE PROTECTION AND REPAIR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov

The paper presents a methodology for assessing the quality of epoxy compounds used for the protection and repair of concrete structures. The results of mechanical tests of the resulting composites are presented. Using thermometry, the heat release during hardening of the compounds has been assessed. The dependence of the limiting temperature on the ratio of the components of the matrix part of the composite material and the degree of filling with mineral powder has been established. The results of numerical simulation of the process of heat dissipation during hardening of epoxy composites are presented. Based on the test results, the most rational ratio of components in the preparation of repair compositions is determined.

Keywords: structural materials, composite materials, epoxy resin, thermometry, mechanical testing, structural repair, defects in reinforced concrete structures

Введение

Железобетонные конструкции составляют основу несущих каркасов большинства современных сооружений, однако во время эксплуатации они подвергаются воздействию различных факторов, таких, как неблагоприятные климатические условия и механические нагрузки, что может привести к появлению дефектов и повреждений. На фотографиях (рис. 1) приведены примеры дефектов, развивающихся при эксплуатации поврежденных железобетонных изделий и конструкций. Для предотвращения дальнейшего разрушения, сохранения несущей способности или восстановления защитного

слоя бетона используются ремонтные составы на минеральной или полимерной основе. Анализ сведений о различных способах ремонта сооружений, строительных конструкций и отдельных конструктивных элементов, приведенных в патентных и литературных материалах, показывает, что наиболее перспективными для этих целей являются эпоксидные композиционные материалы [1]. К их преимуществам можно отнести хорошую адгезию по отношению к большинству материалов, значительную проникающую способность, высокие механические показатели и темп набора прочности [2]. Ранее в состав таких рецептур, как правило, входили следующие компоненты: основа – эпоксидный клей ЭД-20, пластификатор – дибутилфталат или окситерпеновый растворитель, отвердитель – полиэтиленполиамин, наполнитель – портландцемент [3]. Как показала практика, получаемые составы не всегда удовлетворяли требованиям производителей работ по таким технологическим параметрам, как время жизни клея после добавления отвердителя, экзотермия и свойства отвержденного состава.

В течение ряда лет зарубежные производители (Belzona, Sika, Basf и др.) занимали существенную часть отечественного рынка полимерных и композиционных материалов для ремонта и защиты строительных конструкций [4, 5]. В настоящее время существует потребность ускоренного внедрения современных отечественных продуктов в эту сферу строительства на основе относительно доступных диановых эпоксидных смол, применение которых было регламентировано ранее [3].

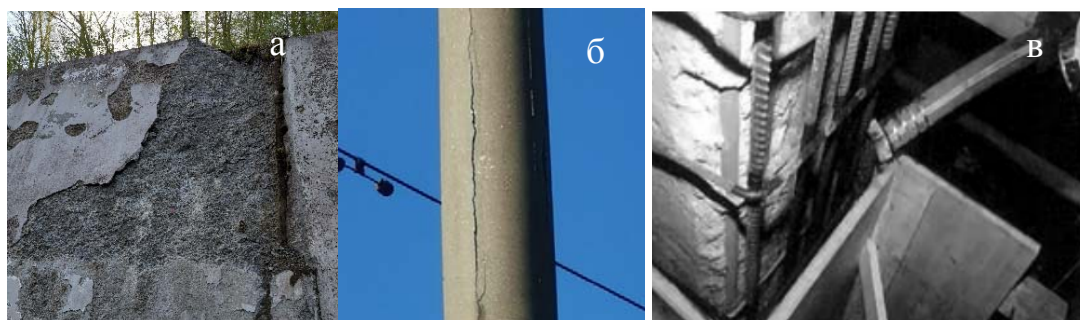


Рис. 1. Дефекты железобетонных конструкций:

- а – деструкция элемента подпорной стены (пгт Красная Поляна);
- б – продольное растрескивание стойки опоры ЛЭП (Калужская обл.);
- в – нарушение защитного слоя колонны промышленного здания

Материалы и методы

Анализ справочной литературы показал, что современные ремонтные и защитные составы на полимерной основе должны удовлетворять следующим пороговым требованиям [3, 4, 5]: возможность приготовления и отверждения при температуре от +4 до +30 °С; адгезионная прочность, превышающая когезионную прочность бетонного основания (М300); прочность на сжатие/растяжение/сдвиг – 45/9/6 МПа; умеренная экзотермия; стойкость к расслоению.

Объектом исследований являлись эпоксидные ремонтные составы российского производства:

№1 – двухкомпонентный низковязкий компаунд Этал-145м;

№2 – двухкомпонентный тиксотропный клеевой состав Этал-Адгезив-331;

№3 – трехкомпонентный компаунд Смэл 04-25, состоящий из смолы (А), отвердителя (Б) и минерального наполнителя (соотношение смола:наполнитель=1:2 (по массе)).

Контрольные образцы для оценки физико-механических показателей изготавливали методом литья с последующим калиброванием для обеспечения равномерности (рис. 2).

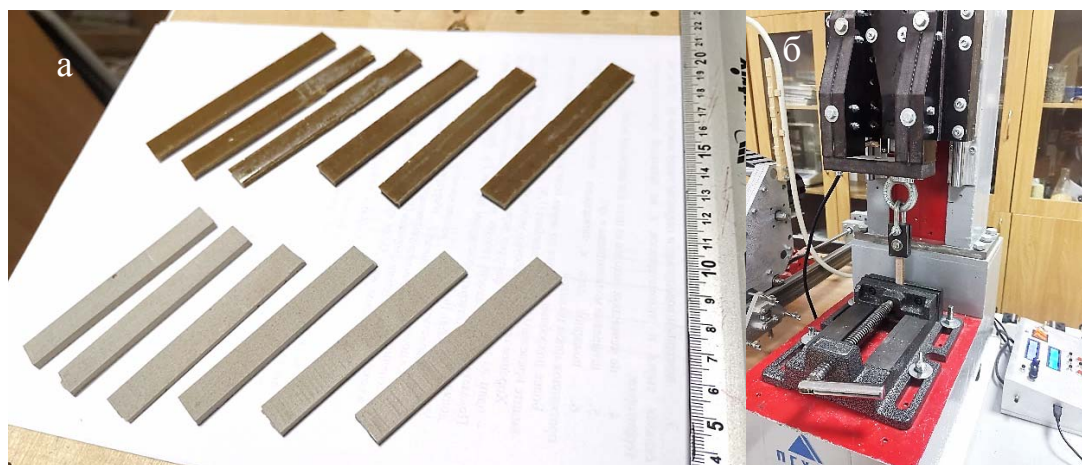


Рис. 2. Определение механических характеристик при растяжении:
а – контрольные образцы; б – процесс испытания на разрывной машине

Средняя плотность определялась по ГОСТ 15139-69, предел прочности при сжатии и относительная деформация при максимальном напряжении сжатия – по ГОСТ 4651-2014, прочность при растяжении и относительная деформация при максимальном напряжении растяжения – по ГОСТ 11262-2017, прочность при сдвиге – по ГОСТ 14759-69, прочность при отрыве от поверхности бетона – по ГОСТ 14760-69.

Результаты испытаний

В процессе механических испытаний были получены диаграммы нагружения эпоксидных составов, предварительно отвержденных в течение 24 ч. Усредненный вид кривых, характеризующих поведение контрольных образцов, показан на рис. 3.

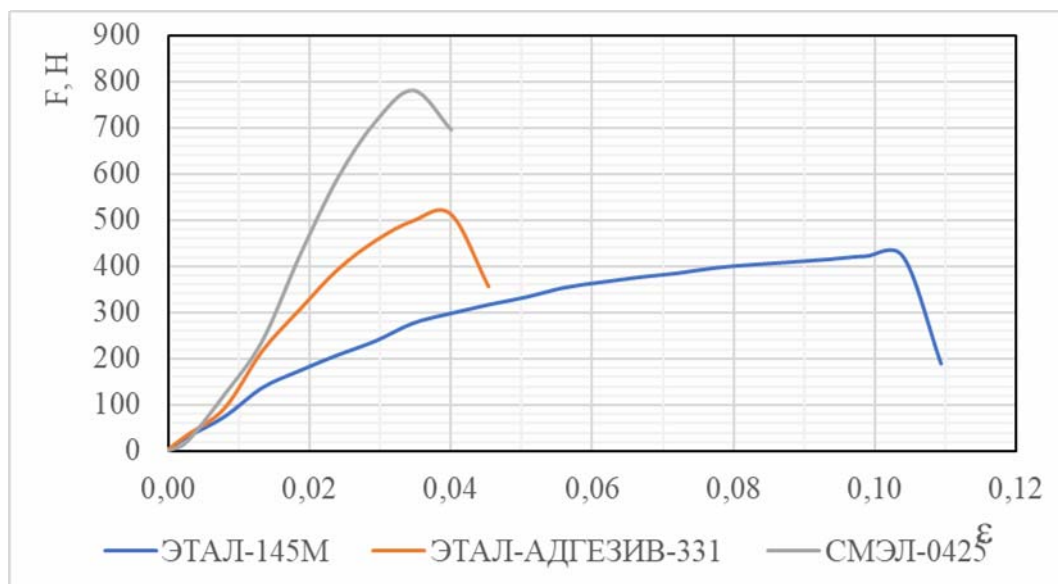


Рис. 3. Диаграммы растяжения контрольных образцов

Высокая реакционная способность эпоксидных групп способствует образованию прочных адгезионных контактов с силикатами бетона или заполнителя из большинства магматических горных пород. Основой кристаллической структуры силикатов являются кремнийкислородные тетраэдры, поверхность которых гидроксильрована (рис. 4).

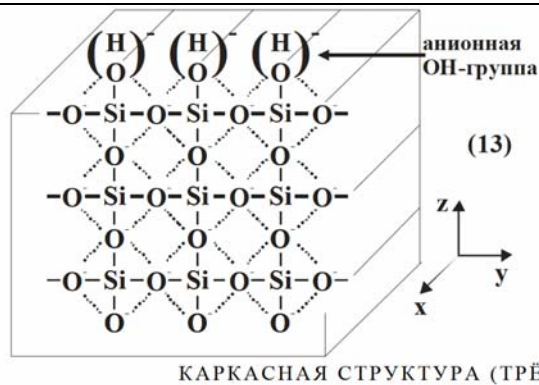
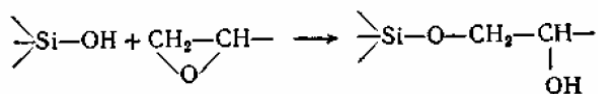


Рис. 4. Трехмерная каркасная структура силикатов [6]

Эпоксидные смолы химически взаимодействуют с гидроксилами на поверхности силикатов с формированием прочных адгезионных контактов.



Определение значений прочности при отрыве проводили с использованием адгезиметра ПМО-ИГ 4. На рис. 5 показан характер разрушения зон клеевого контакта.

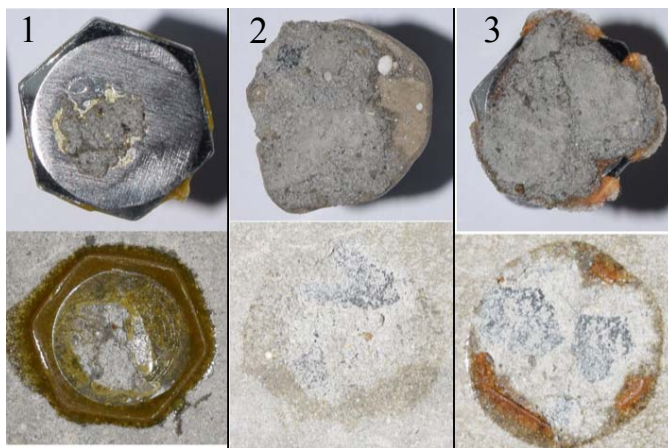


Рис. 5. Характер разрушения зон клеевого контакта (номера обозначены составы)

Разница адгезионных показателей обусловлена неоднородностью структуры поверхностных слоев бетона, влияющей на глубину проникновения смолы при установке штампа. Результаты определения физико-механических показателей исследуемых компаундов сведены в таблицу.

Свойства исследуемых составов

Характеристика	Номер состава		
	1	2	3
Средняя плотность, г/см ³	1.12	1.01	1.68
Прочность при сжатии, МПа	61.5	25.0	58.9
Прочность при растяжении, МПа	9.35	11.88	14.91
Прочность при сдвиге, МПа	6.28	0.67	8.70
Относительная деформация при максимальном напряжении сжатия, %	46.7	14.2	4.4
Прочность при отрыве, МПа	2,02	3,21	1,57
Относительная деформация при максимальном напряжении растяжения, %	9.1	1.6	1.1

Анализ данных показывает, что состав 3 характеризуется оптимальным сочетанием требуемых показателей свойств. Это позволило обосновать его выбор в качестве базового варианта для дальнейших исследований. Влияние степени наполнения (масс.) эпоксидного связующего кварцевой мукой на прочность при сжатии, среднюю плотность и деформацию при максимальном напряжении сжатия приведено на рис. 6.

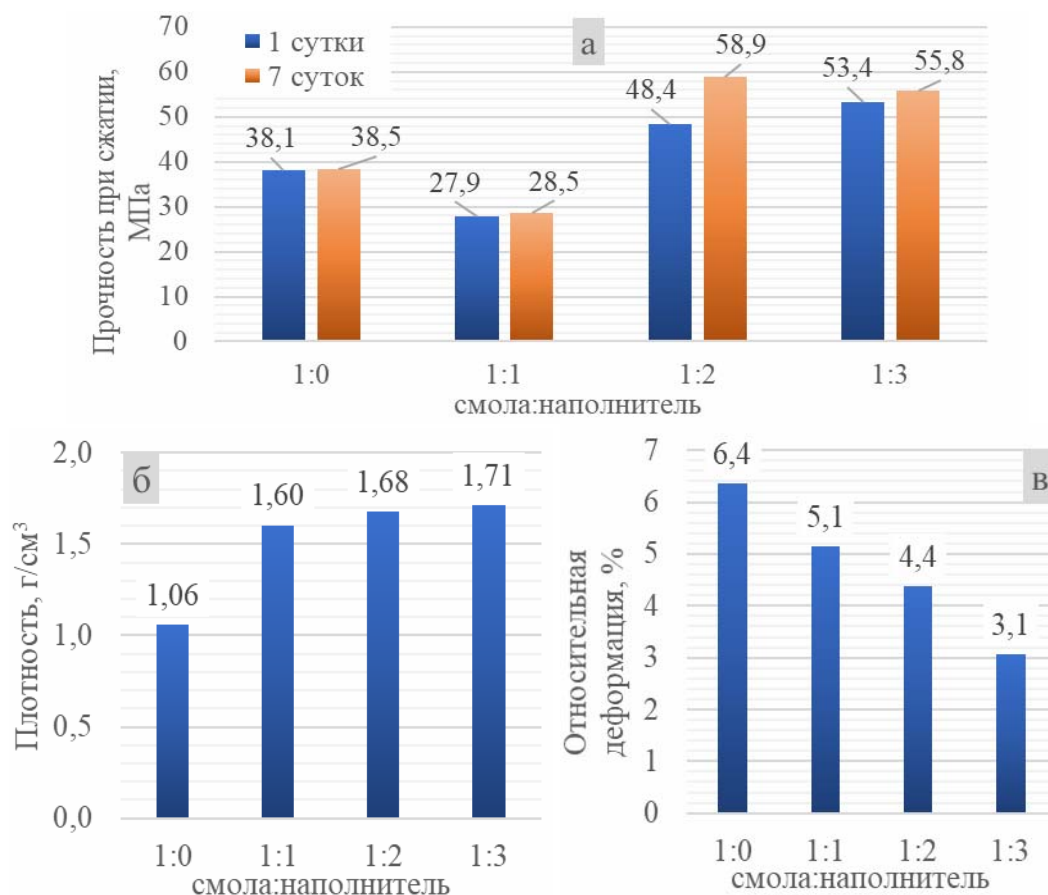


Рис. 6. Свойства эпоксидных композитов при различном соотношении смолы и наполнителя: а – прочность при сжатии; б – средняя плотность; в – относительная деформация

В процессе изготовления экспериментальных образцов установлено значительное тепловыделение составов, прямо зависящее от объема приготавливаемой смеси и материала стенок форм для заливки. При этом превышение температур твердеющей смеси свыше 80...95 °С негативно сказывается на структуре и физико-механических свойствах готового композита. Было исследовано влияние соотношения между компонентами А и Б, а также степени наполнения на экзотермию твердеющих композитов. Оценка тепловыделения осуществлялась посредством термометрии (рис. 7). Для этого использовалась измерительная система лабораторного комплекса полуadiaбатической калориметрии, разработанного на кафедре ТСМиД [3].



Рис. 7. Термометрия твердеющих эпоксидных композитов

Смешивание компонентов осуществлялось лабораторным смесителем в течение 30-40 секунд на малой скорости, затем производилось дозирование установленного количества смеси в термометрические ячейки. Измерение температуры начиналось не позднее 60 секунд с начала смешивания. В качестве ячеек использовались полипропиленовые ёмкости, снабжённые герметичными крышками с отверстиями, в которых фиксировались гильзы термодатчиков. Масса материала в каждой ячейке составляла 30 г. Как показал предварительный эксперимент, большая навеска вызывает выход температуры отдельных составов за верхний предел рабочего диапазона датчиков, ограниченный 125 °С. На рис. 8 приведены термометрические кривые экспериментальных составов.

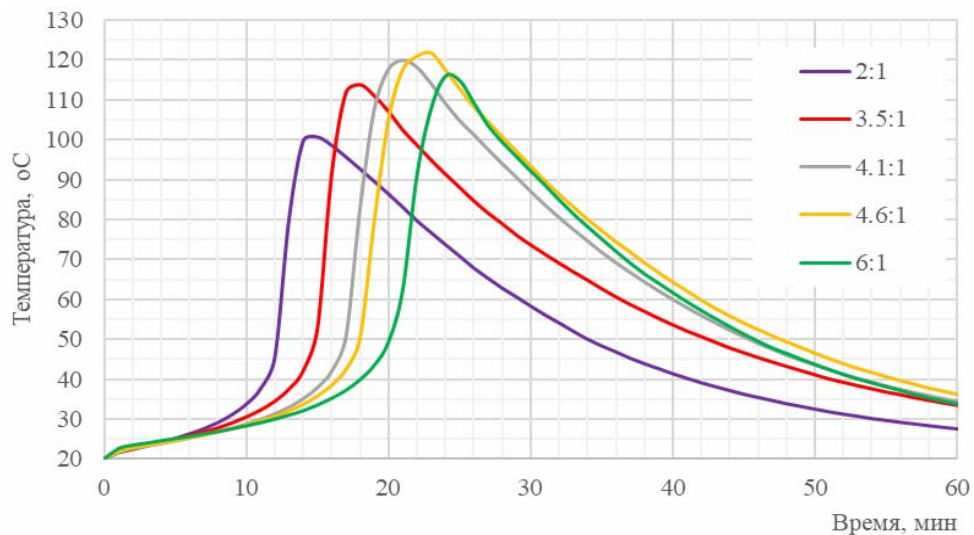


Рис. 8. Термометрические кривые эпоксидных составов при различном соотношении компонентов А и Б

Анализ зависимостей показывает температурный максимум при варьировании соотношения «смола:отвердитель» в диапазоне 4.1-4.6:1, что указывает на интенсивность протекания реакции отверждения полимера. Влияние степени наполнения полимерной матрицы кварцевым компонентом на тепловыделение эпоксидного компаунда при отверждении приведено на рис. 9.

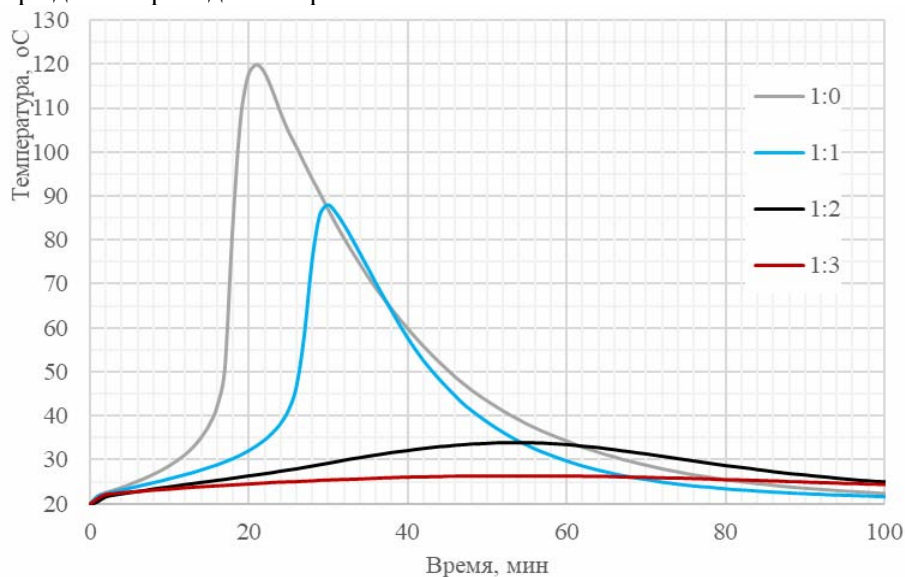


Рис. 9. Влияние содержания кварцевого наполнителя на экзотермию эпоксидного компаунда при отверждении

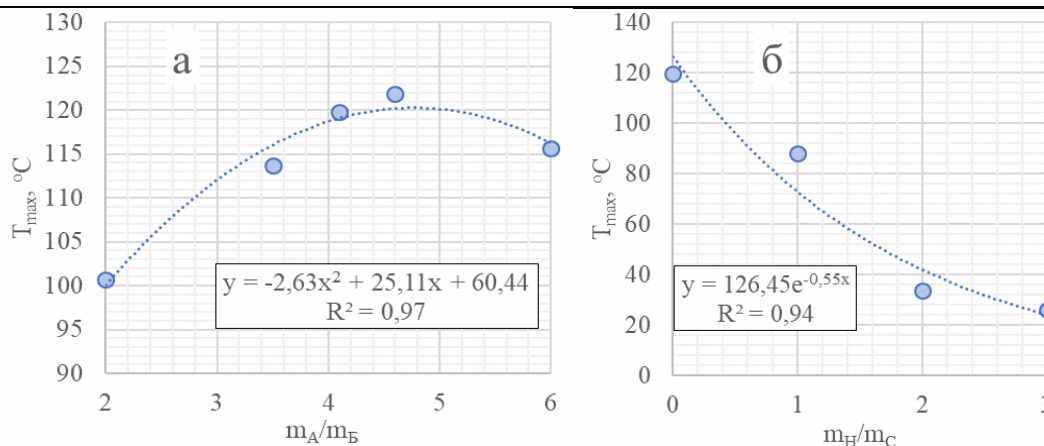


Рис. 10. Зависимость предельной температуры саморазогрева при отверждении эпоксидного компаунда от:

а – массового отношения компонентов матричной части; б – степени наполнения

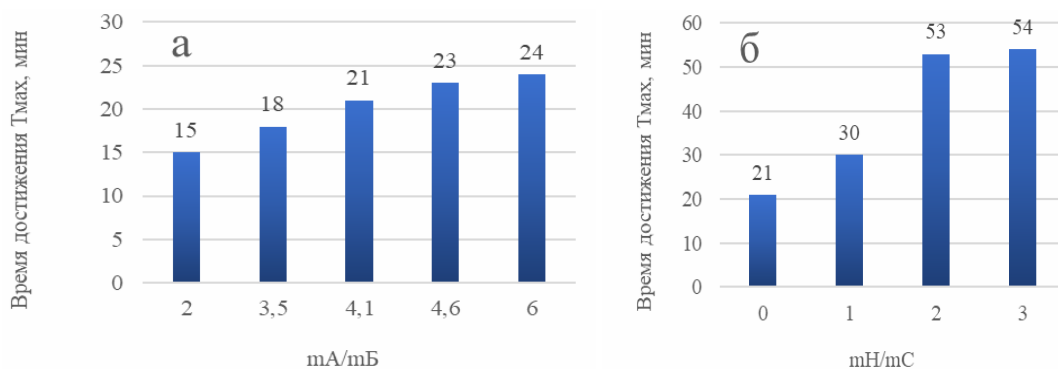


Рис. 11. Зависимость продолжительности достижения предельной температуры от:

а – массового отношения компонентов матричной части; б – степени наполнения

Из термограмм следует, что время достижения предельной температуры существенно увеличивается при добавлении к полимерному вяжущему 200...300 % кварцевого порошка. Это позволяет снизить максимальную температуру смеси в 3,5...4,2 раза как за счет уменьшения объемного содержания полимера, так и посредством аккумулирования выделяемого тепла частицами наполнителя, а также повышения общей теплопроводности твердеющей системы.

Для оценки зависимости теплорассеивающей способности полимерных композиций от степени наполнения кварцевой мукой было произведено численное моделирование методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием модуля Heat Transfer in Solids. В качестве геометрической модели был определен объем твердеющей смеси, ограниченный сферической поверхностью (рис. 12).

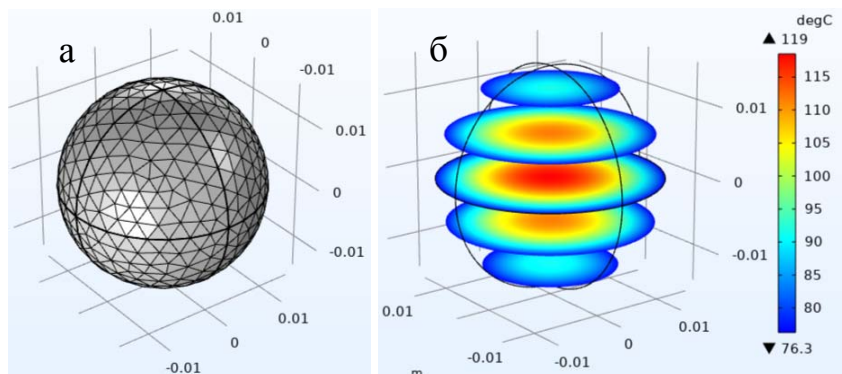


Рис. 12а – конечно-элементная сетка;

б – распределение температур в сечениях расчётной модели объёма смеси без наполнителя

В качестве постоянных параметров принимались температура окружающей среды и коэффициент конвективной теплоотдачи, в качестве варьируемых – средняя плотность, удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности смеси, которые определялись в зависимости от относительного объемного содержания матрицы и наполнителя. Источником тепла, генерируемого за счет экзотермии процесса отверждения смолы, являлся весь объём смеси, тепловая мощность находилась в прямой зависимости от содержания смолы. Результаты численного моделирования экзотермии эпоксидных композитов представлены на рис. 13.

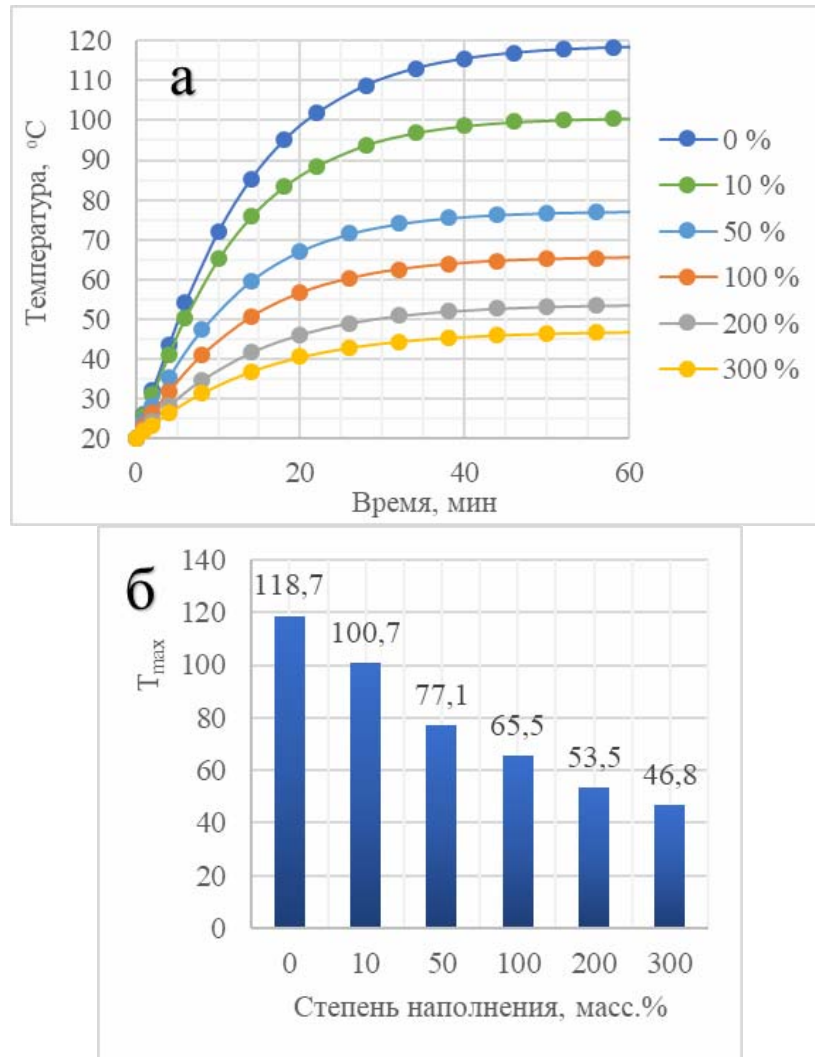


Рис. 13. Результаты численного моделирования экзотермии эпоксидных композитов:
а – кинетика роста температуры во внутреннем объёме модели; б – значение предельных температур после установления стационарного режима теплопереноса

По результатам численного моделирования установлено, что введение 10 % кварцевого наполнителя снижает максимальную температуру эпоксидного композита на 15,2 %, а повышение степени наполнения до 200-300 % сопровождается пропорциональным уменьшением температуры на 55...61 %.

В ходе опытных замесов установлена склонность сырьевых смесей к расслоению при содержании наполнителя менее 200 % от массы смолы (рис. 14).

Таким образом, по совокупности физико-механических показателей, реологии и экзотермии для ремонта железобетонных конструкций и восстановления защитного слоя арматуры оптимальными являются эпоксидные компаунды Смэл 04-25 с массовым содержанием кварцевого наполнителя в количестве 200...300 %. Эпоксидные смолы без наполнителя и с наполнителем, взятым в соотношении 1:1, достигают пика

прочности за 24 часа твердения. При этом составы с массовым наполнением от 1:2 до 1:3 характеризуются растянутым до 7 суток твердения периодом набора предельной прочности. В значительной степени это обусловлено снижением предельной температуры твердеющей смеси, которая влияет на скорость протекания реакции сшивки макромолекул.



Рис. 14. Расслоение смеси при степени наполнения каменной мукой (мас.):
а – 1:1; б – 1:2; в – 1:3

Ещё одной областью применения эпоксидных смол является их использование для создания защитных покрытий поверхностей бетонных изделий и конструкций. Кроме того, эпоксидные смолы и материалы на их основе предназначены для защиты бетонных полов промышленных зданий.

Для проверки эффективности изоляционных эпоксидных покрытий исследовалось водопоглощение бетонных образцов. Производилось сравнение покрытий из эпоксидной смолы марки ЭД-20 без добавок и с добавкой 10 % ацетона (по массе) со специализированными материалами для поверхностной гидрофобизации. Результаты определения водопоглощения приведены на рис. 15.

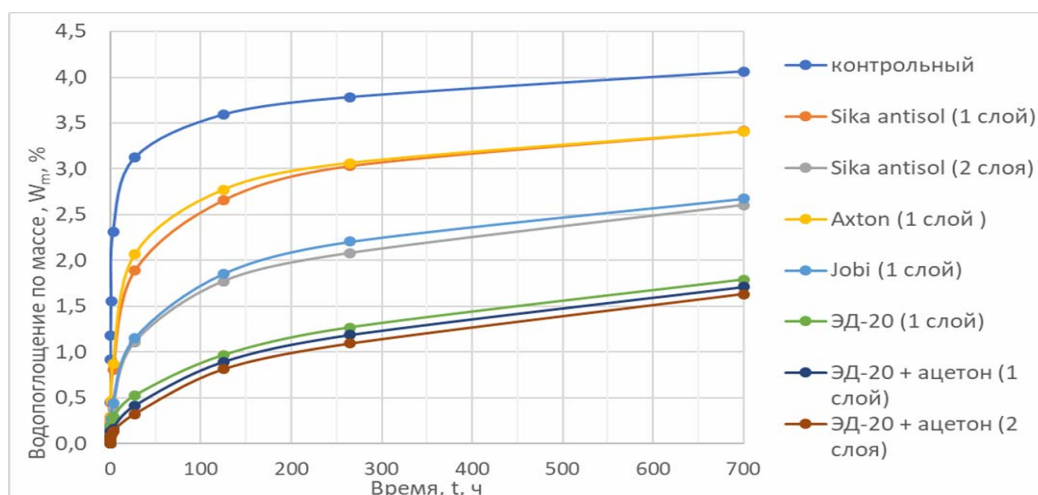


Рис. 15. Кинетика водопоглощения экспериментальных образцов

Результаты указывают на высокую гидроизоляционную эффективность покрытий на основе эпоксидной смолы. Установлено снижение величины водопоглощения в 2,4–2,5 раза по отношению к контрольным образцам без покрытия.

Выводы и заключение

Из исследованных эпоксидных компаундов Смэл 04-25 наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ремонтным составам для железобетонных конструкций.

Введением кварцевого наполнителя обеспечиваются эффективное регулирование реологических характеристик ремонтных составов, скорость набора прочностных показателей и их конечные значения.

Методом термометрии установлено, что при малой степени наполнения полимерной матрицы (менее 200 %) возникает риск критического саморазогрева твердеющего материала, а сырьевые смеси характеризуются седиментационной неустойчивостью.

Расчетные величины снижения предельной температуры при введении минерального наполнителя, полученные при моделировании, ниже экспериментальных данных,

что обусловлено влиянием трудноучитываемого эффекта саморазогрева. Таким образом, численное моделирование позволяет эффективно решать задачи сравнительной экспресс-оценки влияния рецептурных факторов на этапе предварительного подбора рецептур эпоксидных композитов.

Список литературы

1. Овчинников, И.Г. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров // Вестник Евразийской Науки. – 2012. – № 4 (13). – С. 89–111.
2. Узаева, А.А. Ремонтные составы на основе полимерных вяжущих / А.А. Узаева // Инновации и инвестиции. – 2016. – № 4. – С. 134–139.
3. Рекомендации по восстановлению монолитности бетонных и железобетонных конструкций путем инъектирования полимерных составов / под ред Н.А. Кушир; ЦНИИС. – М., 1970. – 29 с.
4. Полимерные решения Belzona для зданий и строений (каталог продукции) // Belzona International Limited. – 2015. – 16 с. – URL: [//www.belzona.com](http://www.belzona.com)
5. Ремонт и защита бетона: технически каталог / ООО «БАСФ Строительные системы». – М., 2010. – 273 с.
6. Чукин, Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма / Г.Д. Чукин. – М.: ООО «Принта», 2008. – 172 с.
7. Береговой, В.А. Переносной калориметр для решения рецептурных задач в области практического бетоноведения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, И.С. Шурыгин, М.Г. Махмудов // Вестник ПГУАС: строительство наука и образование. – 2023. – № 1 (16). – С. 8–15.

References

1. Ovchinnikov, I.G. Issues of Reinforcement of Reinforced Concrete Structures with Composites: 1. Experimental Studies of Composite Reinforcement for Flexural Reinforced Concrete Structures / I.G. Ovchinnikov, S.N. Valiev, I.I. Ovchinnikov, V.S. Zinoviev, A.D. Umirov // Eurasian Science Bulletin. – 2012. – No. 4 (13). – P. 89–111.
2. Uzaeva, A.A. Repair Compositions Based on Polymer Binders / A.A. Uzaeva // Innovations and Investments. – 2016. – No. 4. – P. 134–139.
3. Recommendations for Restoring the Monolithicity of Concrete and Reinforced Concrete Structures by Injecting Polymer Compositions / edited by N.A. Kushir; TSNIIS: – M., 1970. – 29 p.
4. Belzona Polymer Solutions for Buildings and Structures (product catalog) // Belzona International Limited. – 2015. – 16 p. – URL: [//www.belzona.com](http://www.belzona.com)
5. Concrete Repair and Protection: Technical Catalog / LLC «BASF Construction Systems». – M., 2010. – 273 p.
6. Chukin, G.D. Surface Chemistry and Structure of Dispersed Silica / G.D. Chukin. – M.: Paladin Typography, LLC «Print», 2008. – 172 p.
7. Beregovoy, V.A. Portable Calorimeter for Formulating Solutions in Practical Concrete Technology / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, I.S. Shurygin, M.G. Makhmudov // Bulletin of PGUAS: Construction, Science, and Education. – 2023. – No. 1 (16). – P. 8–15.

УДК 691.327.333

DOI 10.54734/20722958_2024_2_110

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

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

Черкасов Василий Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Прикладная механика»,
чл.-корр. РААСН
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Емельянов Алексей Иванович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»
E-mail: emeljanovai@list.ru

Киселев Евгений Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»
E-mail: keva30@rambler.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

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

Cherkasov Vasily Dmitrievich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Applied Mechanics»,
Corresponding Member of the Russian
Academy of Architectural and Construction
Sciences
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Emelyanov Aleksey Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Applied Mechanics»
E-mail: emeljanovai@list.ru

Kiselev Evgeniy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Applied Mechanics»
E-mail: keva30@rambler.ru

ПОЛУЧЕНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА ЕГО ПРОЧНОСТИ С ПОЗИЦИЙ МИКРОМЕХАНИКИ КОМПОЗИТА

В.Д. Черкасов, А.И. Емельянов, Е.В. Киселев

Получены сухие смеси, позволяющие изготавливать неавтоклавные пенобетоны плотностью 400...800 кг/м³, физико-механические характеристики которых соответствуют нормативным требованиям. Установлено, что полученный ячеистый композит преимущественно обладает закрытой пористостью и высоким показателем однородности пор. Проведены исследования цилиндрической (капиллярной) модели ячейки композита. Разработана модель оценки прочности материала, раскрывающая структурообразующую роль пористости материалов.

Ключевые слова: неавтоклавный пенобетон, сухие смеси, прочность, пористость, ячейка, неоднородность, поровое давление, напряжение, этюра

PRODUCTION OF NON-AUTOCLAVE FOAM CONCRETE FROM DRY MIXTURES AND ASSESSMENT OF ITS STRENGTH FROM THE POINT OF COMPOSITE MICROMECHANICS

V.D. Cherkasov, A.I. Emelyanov, E.V. Kiselev

Dry mixtures have been obtained which make it possible to produce non-autoclaved foam concrete with a density of 400...800 kg/m³, the physical and mechanical characteristics of which meet regulatory requirements. It has been established that the resulting cellular composite predominantly has closed porosity and a high pore uniformity index. Some studies have been carried out on a cylindrical (capillary) model of a composite cell. A model for assessing the strength of a material has been developed, revealing the structure-forming role of material porosity.

Keywords: non-autoclaved foam concrete, dry mixtures, strength, porosity, cell, heterogeneity, pore pressure, stress, diagram

Важнейшей задачей современного строительства является ресурсо- и энергосбережение при возведении зданий и их эксплуатации. Данная необходимость заставляет ученых и практиков все чаще обращать внимание на материалы ячеистой структуры (неавтоклавные пенобетоны) [1-7], позволяющие экономить ресурсы при производстве материалов и сберегать все виды энергии при эксплуатации зданий. Целесообразность применения пенобетонов обусловлена их высокой универсальностью, относительной простотой технологии получения при невысоком уровне производственных затрат.

Пенобетонная смесь может использоваться как при изготовлении изделий в заводских условиях, так и в монолитном малоэтажном строительстве в условиях отсутствия развитой производственной инфраструктуры. Одним из перспективных направлений улучшения технологии получения неавтоклавных пенобетонов является их производство на основе сухих смесей. Применение сухих смесей позволяет приготовить ячеистый бетон по одностадийной технологии без специального дорогостоящего оборудования и непосредственно на строительной площадке.

Цель данной работы – получение составов сухих смесей для приготовления неавтоклавных пенобетонов и разработка методов оценки прочности материала с непрерывной неоднородностью с позиций микромеханики композита.

В соответствии с поставленной целью исследованы вопросы влияния сырьевых компонентов на формирование прочностных структур ячеистого композита. Для обеспечения высоких прочностных показателей пенобетона и максимальной простоты технологических процессов исследована широкая номенклатура наполнителей (молотый песок, карбонатные породы). Проведенные исследования показали, что в качестве компонента пенобетона наиболее эффективен мелкодробленый мягкий мел. Такой мел обладает сравнительно легкой размягчаемостью в воде, особенно при интенсивном перемешивании суспензии. Мягкий мел образует достаточно устойчивую и однородную пенобетонную массу, что связано с агрегативным составом твердых частиц мела, их гидрофильностью и способностью прочно удерживать молекулы воды в адсорбционных слоях.

По результатам проведенных исследований получены сухие смеси, позволяющие готовить неавтоклавные пенобетоны плотностью 400...800 кг/м³ [8], составы которых представлены в табл. 1. При этом технология производства изделий достаточно проста: затворяют сухую смесь определенным количеством воды; полученный раствор перемешивают в скоростном смесителе в течение 3–5 мин. Затем пенобетонную смесь выдерживают при нормально-влажностных условиях.

Т а б л и ц а 1

Влияние состава сухой смеси на свойства пенобетона

Плотность пенобетона, кг/м ³	Материалы				Прочность пенобетона при сжатии, МПа
	Цемент, кг	Мел, кг	Пенообразователь ¹ , %	Сульфат железа ² , %	
400	255	109	1,8	19	0,9
500	318	137	1,64	19	1,4
600	382	163	1,54	19	1,9
700	445	191	1,49	19	2,6
800	509	218	1,4	19	3,5

П р и м е ч а н и е . 1 – пенообразователь в сухой смеси берется от массы цемента; 2 – сульфат железа используется во всех составах в качестве добавки, стабилизирующей пену и берется от массы пенообразователя.

Физико-технические свойства пенобетонных образцов определяли в возрасте 28 суток после твердения в н. у. Было установлено, что пенобетоны плотностью 400–800 кг/м³ по морозостойкости и теплопроводности соответствуют нормативным требованиям. Так, прочность образцов плотностью 600 и 800 кг/м³ после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания снизилась на 10 и 2,8 % соответственно. Величина

усадки понижается с увеличением плотности пенобетона (табл. 2) и в интервале плотности 400...800 кг/м³ остается в пределах до 3 мм/м.

Т а б л и ц а 2

Усадка пенобетона

Усадка, мм/м	Плотность пенобетона, кг/м ³				
	400	500	600	700	800
По требованиям ГОСТ для ячеистых бетонов	Не нормируется	Не нормируется	3	3	3
Определенная экспериментально	2,8	2,4	1,9	1,4	1,1

Отличительным свойством теплоизоляционных материалов является высокая пористость, существенно снижающая их теплопроводность. На теплопроводность большое влияние оказывают вид пористой структуры материала, размер и форма пор. Лучшую теплоизоляционную способность имеют материалы с замкнутыми сферическими порами [9].

С увеличением размеров пор и превращением их в открытые каналы ухудшаются теплозащитные свойства. Поэтому всегда стремятся создавать теплоизоляционные материалы с равномерно распределенной мелкопористой структурой. Такая структура не только улучшает теплотехнические свойства, но и повышает прочностные характеристики [10].

В связи с этим определены показатели пористости в соответствии с методикой ГОСТ 12730.4–78 по результатам определения плотности, водопоглощения и сорбционной влажности. Параметрами, характеризующими пористость, являются: полный объем пор P_n , объем открытых капиллярных P_o и некапиллярных P_{m3} пор, объем условно-закрытых пор P_3 , показатель микропористости P_{mk} , показатели среднего размера пор λ и однородности размеров пор α (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Показатели пористости пенобетона

Плотность пенобетона, кг/м ³	Показатели пористости						
	P_n , %	P_o , %	P_{m3} , %	P_3 , %	P_{mk} , %	λ	α
450	80,9	18	4	58,9	0,59	1,1	1,0
590	74,9	21	3,3	50,6	0,54	1,0	0,95

Из табл. 3 видно, что пенобетон преимущественно обладает закрытой пористостью, что способствует улучшению его эксплуатационных характеристик. Показатель однородности пор высокий.

Применение ячеистых бетонов в строительстве происходит в условиях непрерывно возрастающих требований к их физико-техническим характеристикам. Удовлетворение этих требований невозможно без развития исследований в области микромеханики строительных композиционных материалов, направленных на изучение характера изменения их структуры и параметров качества в процессе производства и эксплуатации.

В этой связи проведены исследования цилиндрической (капиллярной) модели ячейки композита, в которой материал твердой фазы обладает неоднородностью непрерывного типа. Прочность ячейки капиллярно-пористого композита оценивали по 3-й теории прочности (теории Кулона). С этой целью определяли эквивалентные напряжения, равные разности главных напряжений:

$$S_{\text{экв}} = \Delta S = S_t - S_r, \quad (1)$$

где S_t и S_r – тангенциальные и радиальные напряжения.

Выполнив подстановку напряжений, определяемых выражениями [6]:

$$S_r = \frac{\sigma_r}{p} = -1 + (1 - \Pi) \left[\frac{\frac{R_r}{R_1} - \frac{R_\omega}{R_1}}{1 - \frac{R_\omega}{R_1}} \right], \quad (2)$$

$$S_t = \frac{\sigma_t}{p} = -1 + (1 - \Pi) \left[\frac{\frac{1}{r^2} \frac{G(r)}{R_1} + \frac{R(r)}{R_1} - \frac{R_\omega(a)}{R_1}}{1 - \frac{R_\omega}{R_1}} \right], \quad (3)$$

где Π – пористость материала; p – поровое давление; r – радиус сферического слоя; R_1 и R_ω – радиусы граничных поверхностей капилляра (наружной и внутренней соответственно); G – модуль сдвига, получили формулу для определения эквивалентных напряжений:

$$S_{\text{экв}} = (1 - \Pi) \frac{1G(r)/R_1}{r^2 1 - R_\omega/R_1}, \quad (4)$$

где $G(r)/R_1$ и R_ω/R_1 определяются из выражений:

$$\frac{R_\omega}{R_1} = \frac{1}{\Pi} \frac{2A_1\omega + B_1}{2A_1 + B_1}, \quad \frac{G(r)}{r^2 R_1} = -\frac{2}{p^2} \frac{A_1 p + B_1}{2A_1 + B_1}. \quad (5)$$

Здесь коэффициенты равны:

$$A_1 = \frac{1-k}{1-\omega}; \quad B_1 = \frac{k-\omega}{1-\omega}; \quad k = \frac{G_\omega}{G_1}, \quad (6)$$

где ω – отношение радиусов капилляра; G_1 и G_ω – модули сдвига в точках граничных поверхностей капилляра (наружной и внутренней соответственно).

Вычисление напряжений по формуле (4) и построение их эпюр по толщине стенки капилляра выполнены для однородного материала ($k=1$) и для материала с радиальной неоднородностью ($k=\omega$). Так же с помощью инверсивного преобразования [11] определены соответствующие напряжения (и построены их эпюры) для материала с неоднородностью, задаваемой параметром $k=\Pi$. В связи с этим напряженное состояние последнего материала можно считать инверсивным состоянию однородного материала. Данные вычисления выполнены для двух групп материалов с различной пористостью – 25 % и 36 %; полученные эпюры представлены на рис. 1, 2.

Анализ эпюр свидетельствует о существовании единственной точки их пересечения. Это означает, что в капилляре существует цилиндрическая поверхность, в точках которой напряжения одинаковы для всех материалов, то есть независимо от значения параметра k . При этом эпюры, отвечающие параметру $k=\Pi$, в отличие от всех других, содержат максимум в упомянутой точке.

Для определения координат данной точки исследуем функцию (4), в результате получим уравнение, решив которое найдем искомую координату:

$$p = \frac{2\omega}{1+\omega} = 2 \frac{\sqrt{\Pi}}{1+\sqrt{\Pi}}. \quad (7)$$

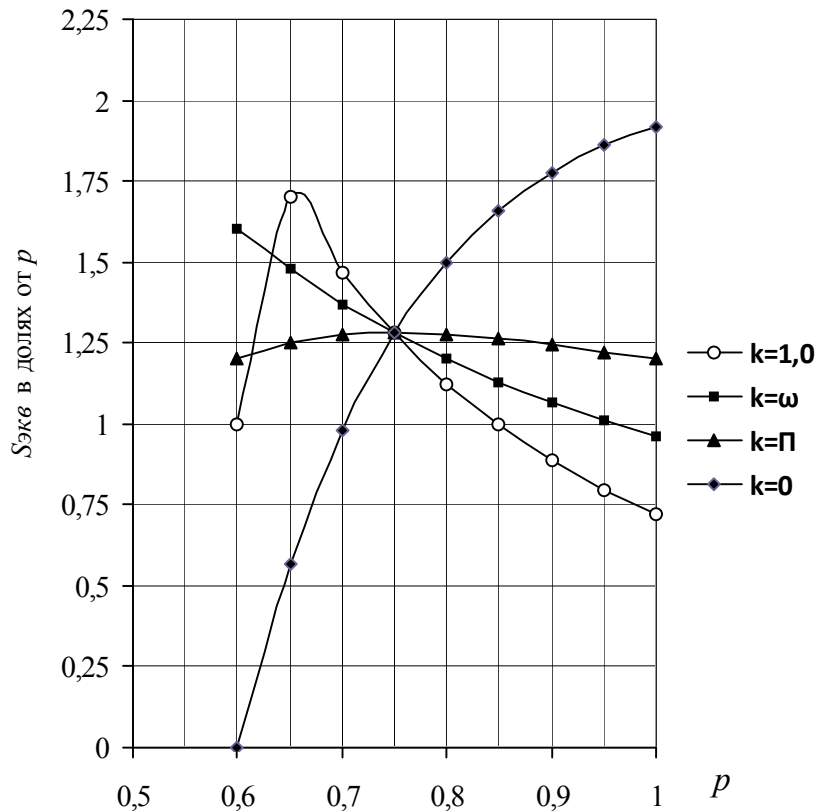


Рис. 1. Эпюры эквивалентных напряжений для материалов пористостью $\Pi=25\%$ и параметрами k , равными 0; 0,25; 0,5; 1,0

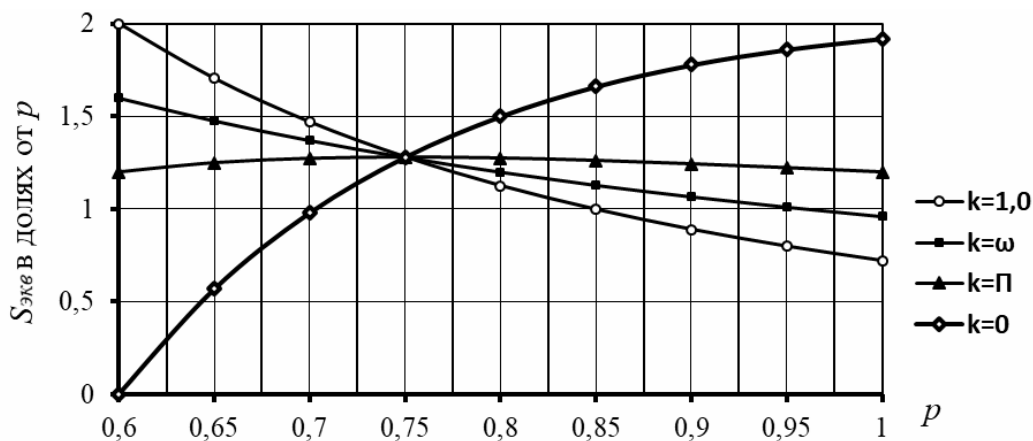


Рис. 2. Эпюры эквивалентных напряжений для материалов пористостью $\Pi=36\%$ и параметрами k , равными 0; 0,36; 0,5; 1,0

Таким образом, при планировании экспериментов со строительными материалами необходимо стремиться к тому, чтобы фактическая неоднородность материала $G(r)$ как можно меньше отличалась от оптимальной неоднородности $G(r)_{\Pi}$, задаваемой функцией [11]

$$G(r)_{\Pi} = G_1 \left[(1 + \omega) p - \omega \right]. \quad (8)$$

Выполненные расчеты показывают, что методами механики твердого деформируемого тела можно связать структурную перестройку микроячейки композита с

упругими свойствами материала отдельных ее компонентов и величинами их напряжений.

Результаты проведенных практических исследований и теоретических изысканий позволяют сделать вывод о том, что показатели качества ячеистого композита существенно зависят не только от состава и свойств его компонентов, но и от начальных значений порового давления и пористости, выполняющей структурообразующую роль.

Список литературы

1. Славчева, Г.С. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства / Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов, М.В. Новиков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 20–24.
2. Леонович, С.Н. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона / С.Н. Леонович, Д.В. Свиридов, А.Л. Беланович, В.П. Савенко, С.А. Карпушенков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 25–29.
3. Макшин, Н.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками / Н.А. Макшин, А.И. Кудяков, Е.А. Бартеньева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – №8. – С. 58–68.
4. Моргун, В.Н. Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами / В.Н. Моргун, Л.В. Моргун // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 50–54.
5. Давидюк, А.А. Преимущества в производстве и применении блоков из ячеистого бетона / А.А. Давидюк, Е.С. Фискинд, О.А. Гусарь, В.В. Балакирева // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 41–43.
6. Кудяков, А.И. Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой / А.И. Кудяков, И.А. Прищепа, С.П. Осипов // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 40–49.
7. Местников, А.Е. Цементный пенобетон из портландцементного клинкера и природного минерального сырья Арктической зоны России / А.Е. Местников, А.И. Кудяков, В.К.Рожин // Цемент и его применение. – 2020. – № 2. – С. 2–5.
8. Емельянов, А.И. Исследование влияния пенообразователей для ячеистых бетонов на структурообразование цементного камня / А.И. Емельянов, Д.С. Юрченков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – №5. – С. 42–48.
9. Горлов, Ю.П. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / Ю.П. Горлов, И.Ф.Еремин, Б.У.Седунов. – М.: Стройиздат, 1976. – 192 с.
10. Дятков, Е.М. Тугоплавкие теплоизоляционные материалы, полученные способами пенно- и газообразования / Е.М. Дятков, С.А. Гайлевич, Г.Я. Миненкова, С.Л. Радченко // Стекло и керамика. – 2002. – № 2. – С. 20–23.
11. Черкасов, В.Д. Теория двухсвязных моделей микромеханики композитов / В.Д. Черкасов, А.С. Тюряхин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 108 с.

References

1. Slavcheva, G.S. Thermally efficient foam concrete of a new generation for low-rise construction / G.S. Slavcheva, E.M. Chernyshov, M.V. Novikov // Construction materials. – 2017. – No. 7. – P. 20–24.
2. Leonovich, S.N. Dry mixture for producing heat-resistant foam concrete / S.N. Leonovich, D.V. Sviridov, A.L. Belanovich, V.P. Savenko, S.A. Karpushenkov // Construction materials. – 2017. – No. 7. – P. 25–29.
3. Makshin, N.A. Non-autoclaved foam concrete, dispersedly reinforced with mineral and fibrous additives / N.A. Makshin, A.I. Kudyakov, E.A. Barteneva // News of higher educational institutions. Construction. – 2018. – No. 8. – P. 58–68.

4. Morgun, V.N. Properties of foam concrete when dispersedly reinforced with polypropylene and carbon fibers / V.N. Morgun, L.V. Morgun // Construction materials. – 2022. – No. 9. – P. 50–54.
5. Davidyuk, A.A. Advantages in the production and use of cellular concrete blocks / A.A. Davidyuk, E.S. Fiskind, O.A. Gusar, V.V. Balakireva // Construction Materials. – 2018. – No. 12. – P. 41–43.
6. Kudyakov, A.I. Non-autoclaved cement foam concrete with thermally modified peat additive / A.I. Kudyakov, I.A. Prishchepa, S.P. Osipov // Construction materials. – 2022. – No. 1–2. – P. 40–49.
7. Mestnikov, A.E. Cement foam concrete from Portland cement clinker and natural mineral raw materials of the Arctic zone of Russia / A.E. Mestnikov, A.I. Kudyakov, V.K. Rozhin // Cement and its application. – 2020. – No. 2. – P. 2–5.
8. Emelyanov, A.I. Study of the influence of foaming agents for cellular concrete on the structure formation of cement stone / A.I. Emelyanov, D.S. Yurchenkov // News of higher educational institutions. Construction. – 2021. – No. 5. – P. 42–48.
9. Gorlov, Yu.P. Fireproof and heat-insulating materials / Yu.P. Gorlov, I.F. Eremin, B.U. Sedunov. – M.: Stroyizdat, 1976. – 192 p.
10. Dyatkov, E.M. Refractory heat-insulating materials obtained by foam and gas generation methods / E.M. Dyatkov, S.A. Gailevich, G.Ya. Minenkova, S.L. Radchenko // Glass and ceramics. – 2002. – No. 2. – P. 20–23.
11. Cherkasov, V.D. Theory of doubly connected models of micromechanics of composites / V.D. Cherkasov, A.S. Tyuryakhin. – Saransk: Mordov Publishing House. un-ta, 2009. – 108 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.04

DOI 10.54734/20722958_2024_2_117

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

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

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

Куприяшкина Людмила Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Бабушкина Дельмира Рафиковна,
аспирантка 3-го курса кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Бусаргин Дмитрий Александрович,
аспирант 1-го курса кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: busargin20@mail.ru

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

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

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

Kupriyashkina Liudmila Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department "Building Structures"
E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Babushkina Delmira Rafikovna,
3rd year postgraduate student of the
Department "Building Structures"
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Busargin Dmitry Aleksandrovich,
1st year postgraduate student of the
Department "Building Structures"
E-mail: busargin20@mail.ru

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА С УЧЕТОМ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ

В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, Д.Р. Бабушкина, Д.А. Бусаргин

Рассмотрена модель разрушения твердого тела под действием сжимающих усилий. Модель разрушения представлена в виде пластины с эллиптической трещиной, оси которой имеют произвольную ориентацию. Предположено, что материал пластины представляет собой фрактальную систему.

Получены условия разрушения, которые позволяют учесть влияние: структурной неоднородности; ориентации осей трещины на механизм (сдвиговой или отрывной) разрушения.

Ключевые слова: разрушение, структура, фрактальная размерность, модель, прочность

THE MECHANICS OF CONCRETE DESTRUCTION, TAKING INTO ACCOUNT THE FRACTAL PROPERTIES OF THE STRUCTURE

V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, D.R. Babushkina, D.A. Busargin

A model of the destruction of a solid body under the action of compressive forces is considered. The fracture model is presented in the form of a plate with an elliptical crack, the axes of which have an arbitrary orientation. It is assumed that the plate material represents a fractal system.

The fracture conditions are obtained, which allow us to take into account the influence of: structural heterogeneity; orientation of the crack axes on the mechanism (shear or tear-off) fracture.

Keywords: destruction, structure, fractal dimensionality, model, durability

Разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, который развивается во времени, и при этом на разных масштабных уровнях структуры могут действовать одновременно несколько механизмов разрушения: хрупкий, пластический, отрывной, сдвиговой. Поэтому до настоящего времени не существует единой работоспособной теории прочности (разрушения) бетона, и проблема ее создания остается актуальной [1–6].

На первом этапе создания теории разрушения твердых тел рассматривалась бесструктурная модель, согласно которой твердое тело принималось абсолютно однородным, изотропным, без дефектов в виде сплошной среды.

В качестве критериев разрушения принимались наибольшие: нормальные напряжения (Г. Галилей); удлинения (Б. Мариотт); касательные напряжения (Ш. Кулон) или совместное действие касательных и нормальных напряжений (О. Мор) [6].

Под критерием разрушения понимали прочность или деформации, соответствующие предельным значениям контролируемого параметра, при достижении которого нагруженное твердое тело переходило в состояние хрупкого или пластического разрушения, разделения на отдельные части.

Новый этап в развитии теории разрушения принято связывать с работами Г. Колосова, который теоретически показал, что напряжения в объеме реального твердого тела распределяются неравномерно. Около дефектов (пор, инородных включений) напряжения значительно превышают средние значения по площади или по объему, и именно под их действием формируются очаги локального разрушения материала. В это же время экспериментальными данными А. Йоффе и А. Гриффитса было установлено, что прочность твердого тела зависит от дефектов (пор, трещин), которые имеются в структуре твердого тела. А. Гриффитс предложил рассматривать разрушение как процесс развития магистральной трещины, которая формируется путем накопления и развития микродефектов структуры под действием внешней нагрузки. Развитие магистральной трещины сопровождается разрывом связей между частицами материала и образованием новых поверхностей, ростом длины трещины [7, 8].

Модель разрушения твердого тела А. Гриффитс представил в виде пластины, содержащей эллиптическую трещину размером $2l$, находящуюся под действием растягивающих напряжений σ (рис. 1).

Критерий развития (роста) трещины предложено формировать с учетом изменения энергетического баланса в процессе нагружения. Уравнение энергетического баланса для пластины с трещиной можно записать в виде уравнения

$$\Pi(l) = \Pi(0) - U(l) + W(l), \quad (1)$$

где $\Pi(l)$ – потенциальная энергия твердого тела с трещиной l ; $\Pi(0)$ – потенциальная энергия твердого тела без трещины; $U(l)$ – энергия, высвобождающаяся при разрыве внутренних связей; $W(l)$ – поверхностная энергия, приобретенная при образовании новых поверхностей.

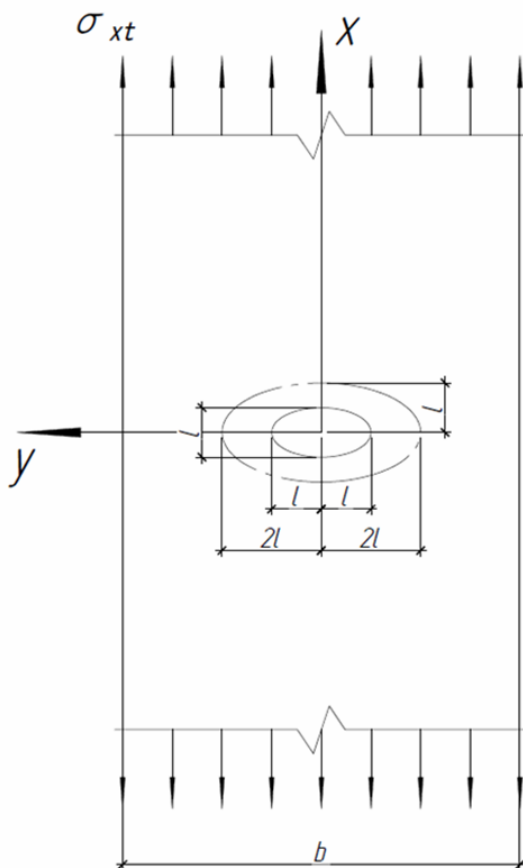


Рис. 1. Модель разрушения твердого тела под действием растягивающих напряжений

Трещина будет расти при выполнении условия

$$\frac{\partial U(l)}{\partial l} \geq \frac{\partial W(l)}{\partial l}. \quad (2)$$

Предложено (Инглис, Гриффитс) потенциальную энергию, высвобождающуюся при развитии трещины, определять в эллиптическом объеме, окружающем трещину, с размерами полуосей $l \times 2l$. Тогда уравнение (1) баланса энергий примет вид:

$$\Pi(l) = \frac{\sigma^2}{2E} V - \frac{\pi}{E} \sigma^2 l^2 + 4\gamma l, \quad (3)$$

где V – объем деформируемого твердого тела.

Из условия развития трещины (2) имеем:

$$2l\pi \frac{\sigma^2}{E} \geq 4\gamma. \quad (4)$$

Исходя из полученного выражения критерии разрушения можно записать в следующем виде.

Трещина будет расти при выполнении условий:

$$\sigma_i \geq \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}, \quad (5)$$

$$l \geq \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2}. \quad (6)$$

В отличие от модели Гриффитса в реальном теле магистральная трещина может иметь произвольную ориентацию; развитие трещины может происходить под действием сжимающих усилий; вновь образованные поверхности не являются идеально гладкими. Попытаемся последовательно рассмотреть влияние этих факторов на критерии разрушения.

Предположим, что ось трещины образует с горизонтальной осью поперечного сечения пластины угол α , который равен углу между нормалью к оси трещины и линией действия нагрузки (см. рис. 2). Тогда можно записать условие прочности при растяжении:

$$\sigma_{xt} \leq R_{bt} / \cos^2 \alpha, \quad (7)$$

где σ_{xt} – напряжения растяжения; R_{bt} – прочность на растяжение.

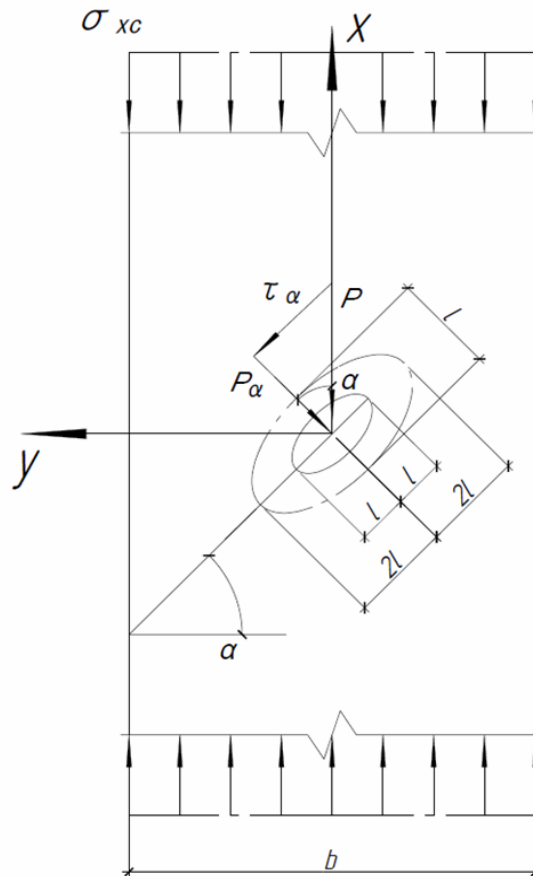


Рис. 2. Модель разрушения твердого тела под действием сжимающих напряжений

При действии сжимающих напряжений σ_{xc} из условия прочности Кулона – Навье имеем:

$$\sigma_{xc} \leq R_{bt} / (0,5 \sin 2\alpha - v \cos^2 \alpha), \quad (8)$$

где v – коэффициент трения.

С учетом наличия в плоскости разрушения трещины, условия прочности примут вид: при растяжении

$$\sigma_{xt} \leq K_1 / \sqrt{\pi l} \cos^2 \alpha; \quad (9)$$

при сжатии

$$\sigma_{xc} \leq K_2 / \sqrt{\pi l} (0,5 \sin 2\alpha - v \cos^2 \alpha), \quad (10)$$

где $K_1^2 = 2E\gamma$; $K_2^2 = 2G\gamma$.

Решение, полученное методом А. Гриффитса, приемлемо при анализе разрушения однородных (бесструктурных) материалов, у которых развитие трещины сопровождается образованием идеально гладких поверхностей.

В действительности поверхность разрушения, особенно у бетона, весьма неоднородна, изломана, изрезана. Степень ее неоднородности (шероховатости) зависит от структуры, крупности наполнителей и заполнителей. Геометрические особенности профиля поверхности разрушения бетонных образцов, при всем их многообразии, соответствуют принципу самоподобия [9].

Экспериментальными исследованиями структуры бетона, проведенными на кафедре строительных конструкций МГУ им. Н.П. Огарева, выявлено самоподобие структур на различных масштабных уровнях, определены значения фрактальной размерности в зависимости от состава, соотношения, компонентов структуры, крупности наполнителя и заполнителя [1,6,9].

В работах Л.М. Ошкиной и Л.И. Куприяшкиной представлен фрактальный анализ структуры бетона по данным распределения пор, микротвердости, в пределах поперечного сечения образца [10, 11]. Фрактальная размерность D_m определялась по формуле Мандельброта – Ричардсона, методом покрытия поперечного сечения квадратами:

$$N(\delta) = \alpha \delta^{D_e - D_m}, \quad (11)$$

где N – число квадратов со стороной δ , покрывающих исследуемое пространство; α – коэффициент; D_e – размерность по Евклиду; D_m – размерность по Мандельброту (фрактальная).

Установлено, что фрактальная размерность зависит от количества и соотношения наполнителей (песок/цемент – x_2 ; цеолит – x_1). Экспериментальные данные приведены в табл. 1 и 2:

Т а б л и ц а 1

Фрактальная размерность структуры цементных композитов

№ состава	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К-во цеолита (x_1)	20 %	10 %	10 %	13 %	17 %	10 %	10 %	17 %	13 %	13 %
Песок/цемент (x_2)	1/1	4/1	1/1	3/1	2/1	2/1	3/1	1/1	1/1	2/1
В/Ц (x_3)	0,6	0,6	0,9	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7
D (увел×10)	2,03	2,55	2,16	2,20	2,42	2,22	2,20	2,07	2,03	2,13
D (увел×25)	2,03	2,47	2,24	2,19	2,40	2,20	2,20	2,05	2,02	2,11

Т а б л и ц а 2

Фрактальная размерность цементно-песчаного раствора

Степень наполнения, %	Соотношение «цемент/песок»		
	1 : 2	1 : 3	1 : 4
10	1,418	1,430	1,445
20	1,390	1,415	1,428
30	1,420	1,433	1,435

На рис. 3 показана зависимость прочности цементных композитов от фрактальной размерности.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что между прочностью материала и фрактальной размерностью существует корреляционная зависимость, и, очевидно, в уравнении (2) необходимо учитывать неоднородность поверхности разрушения.

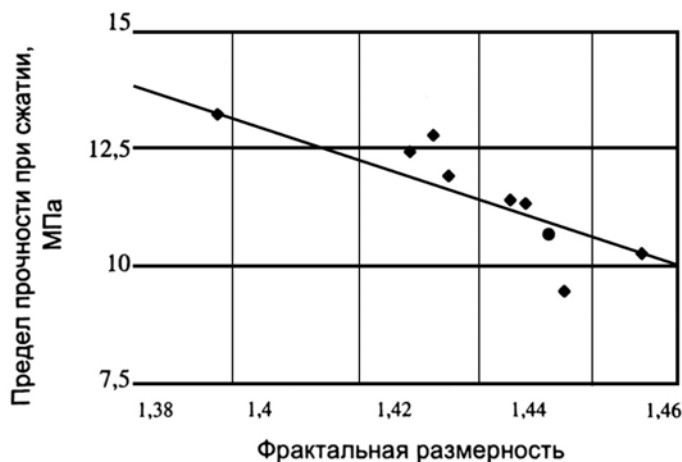


Рис. 3. Зависимость прочности цементных композитов от фрактальной размерности

Модель Гриффитса строится на предположении, что в процессе развития трещины образуются идеально гладкие поверхности разрушения, площадь которых равна $S = 4lb$, где $b = 1$ – толщина пластины, фрактальная размерность для этой модели равна 1 ($D = 1$).

В действительности при разрушении образца из бетона образуются поверхности, изломанность, изрезанность, шероховатость которых зависит от крупности наполнителя, водоцементного отношения, условий твердения и т.д. Поверхность разрушения (в данной модели $S = 4l$) имеет фрактальную структуру, и ее реальная площадь может быть описана с применением закона Мандельброта – Ричардсона (11) [9, 12]:

$$l = \alpha \delta^{D_e - D_m} = l_0 \delta^{D_e - D_m}, D_m > D_e. \quad (12)$$

В формуле (12) с учетом принципа соответствия принято $\alpha = l_0$, где l_0 – длина трещины без учета шероховатости поверхности. Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\Pi(l) = \frac{\sigma^2}{2E} V - \frac{\pi}{E} \sigma^2 l^2 + 4l\gamma \delta^{1-D}. \quad (13)$$

С учетом условия развития трещины $\partial \Pi / \partial l = 0$ получаем:
– критическая длина трещины

$$l_c = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma^2} \delta^{1-D} = \frac{K_1^2}{\pi \sigma^2} \delta^{1-D}; \quad (14)$$

– критическое напряжение при растяжении

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l} \delta^{1-D}} = \frac{K_1 \delta^{0,5(1-D)}}{\sqrt{\pi l}}. \quad (15)$$

При сжатии разрушение бетона возможно путем среза или путем развития трещины растягивающими усилиями (рис. 2).

В первом случае принимаем за основу модель Кулона – Навье, получаем из условия (10) выражение (16) для критического напряжения при сжатии. Так как максимальному значению соответствует угол $\alpha = 45^\circ$, то имеем:

$$\sigma_{c2} \leq \frac{2K_2}{\sqrt{\pi l} (1-\nu)}, \quad (16)$$

где K_2 – коэффициент интенсивности напряжений при сдвиге; ν – коэффициент внутреннего трения.

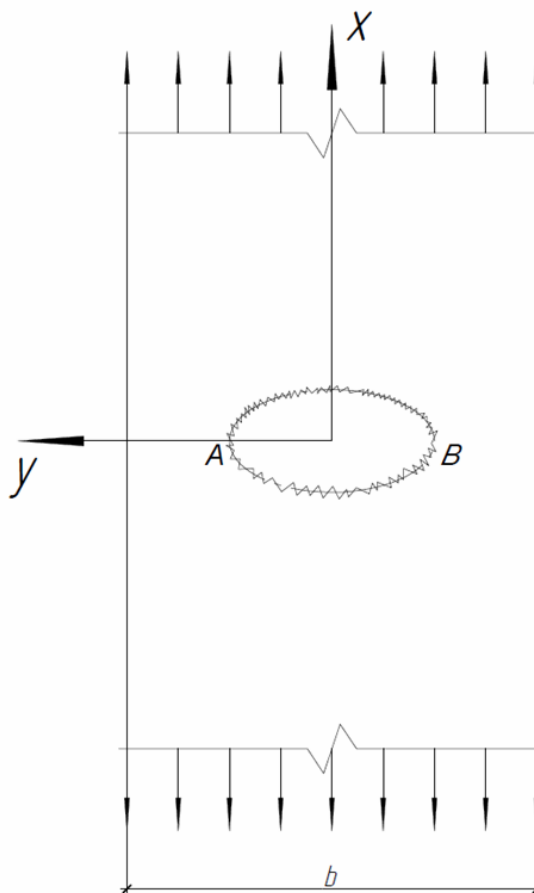


Рис. 4. Фрактальная модель разрушения твердого бетона

Если предположить, что разрушение при сжатии бетона будет происходить под действием растягивающих напряжений, возникающих в результате поперечной деформации ε_y , то по закону Гука имеем:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x). \quad (17)$$

Так как $\sigma_y = 0$, то можно записать $\varepsilon_y E = -\mu\sigma_x$. Очевидно, что наиболее опасной, при заданной схеме нагружения, будет трещина, расположенная под углом $\alpha = 90^\circ$. Тогда условие разрушения по отрывному механизму при сжатии примет вид:

$$\sigma_{c1} \leq \frac{R_{bt1}}{\mu} = \frac{K_1}{\sqrt{\pi l}} \frac{1}{\mu}. \quad (18)$$

Сопоставляя полученные выражения (16) и (18), можно сделать вывод, что разрушение по отрывному механизму возможно, если будет выполняться условие $\sigma_{c2} / \sigma_{c1} > 1$. Отрывной механизм разрушения при сжатии характерен для материалов с высокими значениями коэффициентов Пуассона (μ) и внутреннего трения (ν).

Список литературы

1. Броек, Давид. Основы механики разрушения: пер. с англ. / Давид Броек. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
2. Садовский, М.А. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко // Физика земли. – 1982. – №12. – С. 3–18.

3. Курленя, М.В. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядов атомно-ионных радиусов / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1996. – №12. – С. 3–14.
4. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.
5. Чернышев, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышев, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж: ГАСУ, 2012. – 224 с.
6. Тимошенко, С.П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Гере; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Мир, 1976. – 669 с.
7. Griffith, A.A. The theory of rupture // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft. 1924. – P. 55–63.
8. Чанышев, А.И. Блочно-иерархическая модель деформирования и разрушения горных пород. Экспериментальная проверка и теоретический анализ / А.И. Чанышев, О.Е. Белоусова // ФТПРПИ. – 2003. – №3. – С. 73–84.
9. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Бенуа Б. Мандельброт; пер. с англ. А.Р. Логунова. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
10. Куприяшкина, Л.И. Наполненные цементные композиты: монография / Л.И. Куприяшкина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2007. – 180 с.
11. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина. – Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2001. – 150 с.
12. Селяев, В.П. Фрактальный анализ экспериментальных данных по механике разрушения цементного бетона при растяжении / В.П. Селяев, А.Л. Лазарев, Д.А. Бусаргин, М.Ю. Аверкина // Эксперт: теория и практика. – 2023. – №3(22). – С. 147–152.

References

1. Broek, David. Fundamentals of the mechanics of destruction / David Broek. – Moscow: Higher School, 1980. – 368 p.
2. Sadovsky, M.A. On the property of discreteness of rocks / M.A. Sadovsky, L.G. Bolkhovitinov, V.F. Pisarenko // Physics of the Earth. – 1982. – №12. – P. 3–18.
3. Kurlenya, M.V. On the large-scale factor of the phenomenon of zonal disintegration of rocks and canonical series of atomic–ion radii / M.V. Kurlenya, V.N. Oparin // FTPRPI. – 1996. – №12. – P. 3–14.
4. Selyaev, V.P. Physicochemical foundations of fracture mechanics of cement composites: monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of Mordovian University, 2018. – 220 p.
5. Chernyshev, E.M. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites / E.M. Chernyshev, E.I. Dyachenko, A.I. Makeev. – Voronezh: GASU, 2012. – 224 p.
6. Timoshenko, S.P. Mechanics of materials / S.P. Timoshenko, J. Gere; Translated from English by L. G. Korneychuk; Edited by E. I. Grigolyuk. – M.: Publishing house Mir, 1976. – 669 p.
7. Griffith, A.A. The theory of rupture // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft. 1924. – P. 55–63.
8. Chanyshchev, A.I. Block-hierarchical model of deformation and destruction of rocks. Experimental verification and theoretical analysis / A.I. Chanyshchev, O.E. Belousova // FTPRPI. – 2003. – №3. – P. 73–84.
9. Mandelbrot, B. Fractal geometry of nature / Benoit B. Mandelbrot; Translated from the English by A.R. Logunov. – Moscow: Institute of Computer Research, 2002. – 656 p.
10. Kupriyashkina, L.I. Filled cement composites: monograph / L.I. Kupriyashkina. – Saransk: National Research Mordovian State University, 2007. – 180 p.

11. Selyaev, V.P. Chemical resistance of filled cement composites / V.P. Selyaev, V.I. Solomatov, L.M. Oshkina. – Saransk: National Research Mordovian State University, 2001. – 150 p.

12. Selyaev, V.P. Fractal analysis of experimental data on the mechanics of destruction of cement concrete under tension / V.P. Selyaev, A.L. Lazarev, D.A. Busargin, M.Yu. Averkina // Expert: theory and practice. – 2023. – №3(22). – P. 147–152.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Замалиев Фарит Сахапович,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Металлические конструкции
и испытания сооружений»

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Филиппов Денис Юрьевич,

аспирант кафедры «Металлические
конструкции и испытания сооружений»

Kazan State University of Architecture and Engineering

Russia, 420043, Kazan, 1, Zelenaya St.

Zamaliyev Farit Sakhapovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Metal Structures and Testing
of Structures»

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Filippov Denis Yurievich,

Graduate Student of the Department «Metal
Structures and Testing of Structures»

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК С НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРОЙ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ

Ф.С. Замалиев, Д.Ю. Филиппов

Рассмотрены преднапряженные сталебетонные балки, применяемые в составе перекрытий зданий в качестве ребер, а также поддерживающих конструктивных элементов проемов или различных участков перекрытий. Проведены численные исследования различных видов сталебетонных балок: у которых преднапряженная арматура работает либо совместно с бетоном, либо изолированно, а также когда они расположены параллельно поясам стального профиля или по очертанию эпюры моментов. Полученные результаты численных исследований показывают преимущество размещения преднапряженной арматуры в изолирующей оболочке и по криволинейному очертанию.

Ключевые слова: сталебетонная балка, преднапряжение, напряженное состояние, напрягаемая арматура без сцепления с бетоном

NUMERICAL INVESTIGATIONS OF PRESTRESSED STEEL CONCRETE BEAMS WITH STRESSED REINFORCEMENTS WITHOUT BONDING WITH CONCRETE

F.S. Zamaliev, D.Y. Filippov

Prestressed steel-concrete beams used in building floors as ribs and as well as supporting structural elements of various sections of openings or floors are considered. Numerical studies have been carried out on various types of steel-concrete beams in which prestressed reinforcement either works together with concrete or separately, as well as when they are located parallel to the chords of the steel profile or along the outline of the moment diagram. The obtained results of numerical studies show the advantage of placing prestressed reinforcement in an insulating shell and along a curved outline.

Keywords: steel concrete beam, prestressing, stress state, prestressing reinforcement without adhesion to concrete

Введение. В последнее время в отечественной и зарубежной технической литературе появилось значительное количество публикаций, посвященных преднапряженным сталебетонным изгибаемым элементам. В основном они посвящены элементам, у которых преднапряженная арматура работает совместно с бетоном, как в железобетонных преднапряженных конструкциях.

В то же время Роспатентом выдано множество патентов на новые технические решения по преднапряженным сталебетонным балкам с преднапряженной арматурой, работающей как совместно с бетоном, так и без сцепления с бетоном.

Идея предварительного напряжения достаточно широко используется при производстве и эксплуатации железобетонных и металлических конструкций гражданских зданий. Также различные варианты преднапряжения сталежелезобетонных конструкций применяют в мостовых пролетных строениях. На сегодня актуальными являются исследования преднапряженных конструкций с учетом особенностей работы сталежелезобетонного изгибаемого элемента как составного сечения, так и с применением различных видов преднапряженной арматуры.

Практическая ценность исследований преднапряженных балок заключается, во-первых, в том, что они являются главным несущим элементом в ребристых сталебетонных перекрытиях, во-вторых, выбор типа преднапряженной арматуры позволяет регулировать внутренние усилия и напряжения, что позволит более правильно оценить несущую способность и запроектировать более экономичные и надежные несущие конструкции.

Теоретический анализ. Сталежелезобетонные конструкции сочетают в себе положительные качества как стальных конструкций (легкость и большую прочность элемента на растяжение), так и бетона (его рациональную работу на сжатие). Вопросы современного состояния и перспективы развития сталежелезобетонных конструкций отражены в [1]. Правила проектирования сталебетонных конструкций без преднапряжения нашли отражение в [2]. Деформационные методы расчета изложены в [3]. Известно, что в сталежелезобетонных конструкциях, которые являются составными сечениями, состоящими из двух и более слоев, важным является обеспечение их совместной работы [4–9]. Однако вопросам эффективности преднапряжения сталебетонных конструкций должного внимания не уделялось [10]. Хотя разные виды нагружения и сложное напряженное состояние составных сечений находят отражение в работах [11–13]. Аналитическому и экспериментальному исследованиям посвящены работы [14–15].

Методика и материалы. Сталежелезобетонные балки в численном эксперименте моделировались с использованием программного обеспечения ANSYS для образцов с геометрическими параметрами и нагрузкой по схемам, принимаемым в экспериментальных исследованиях и реальных конструкциях.

При моделировании геометрии плит и стальной части балок использовались как модели из AutoCAD, так и модели, созданные в Design Modeler внутри программы. Сравнив полученные результаты для балок, мы выбрали модели, созданные внутри программы, так как они более точно отражали напряжения в моделях. Расхождения результатов можно объяснить разбиением тела модели на конечные элементы.

Сталебетонные балки имели симметричное сечение с геометрическими и физико-механическими параметрами образцов, используемых в натурных конструкциях.

В программном комплексе совместная работа слоев обеспечивалась контактом *Rough*. В численном эксперименте с использованием пакета программного обеспечения расчеты проводились в три этапа: на первом этапе моделировалась конечно-элементная база образца призмы; на втором этапе регистрировались условия нагружения и физико-механические свойства модели; на третьем этапе составлялся комплекс уравнений, которые были решены методом конечных элементов.

Преднапряжение балок выполнено путем передачи усилий преднапряжения на балку от напрягаемой арматуры. Рассмотрены балки, когда преднапряженная арматура работает в контакте с бетоном (тип I), как в железобетонных конструкциях, а в другой группе – изолированно, путем размещения преднапряженной арматуры в полипропиленовой толстостенной трубке-оболочке (тип II). Кроме того, рассмотрены сталежелезобетонные балки, когда преднапряженная арматура повторяет линию оггибающей эпюры изгибающего момента (тип III).

Для оценки эффективности применения типа преднапряжения балок проведены численные исследования.

Численные эксперименты преднапряженных балок выполнены с помощью Ansys. Исследованные балки являются ребрами сталебетонной ребристой плиты (рис.1).

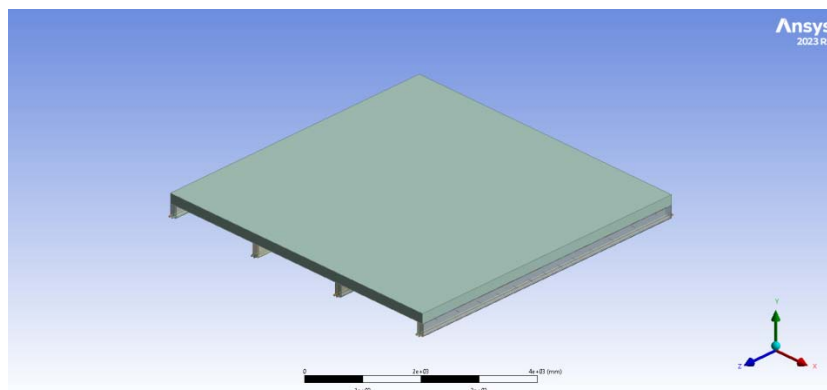
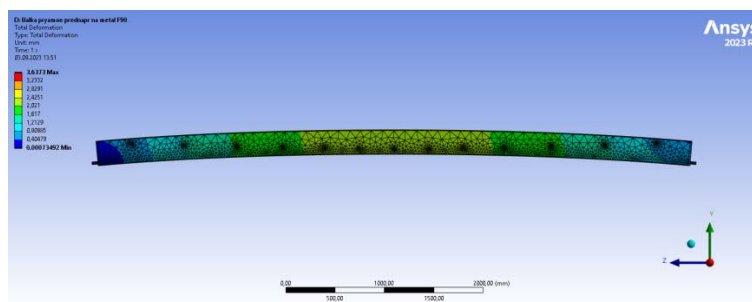
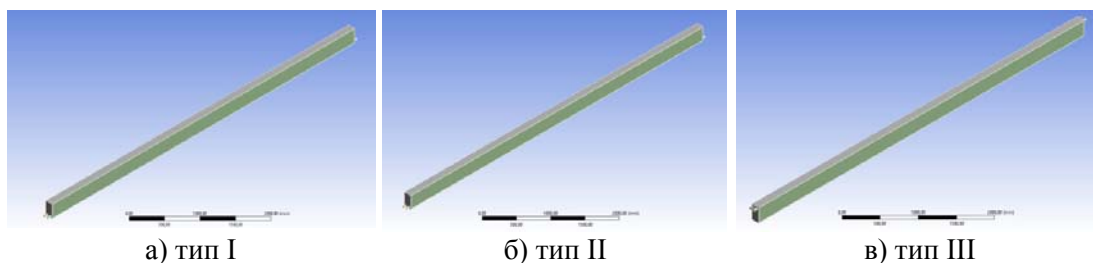


Рис. 1. Ребристая сталебетонная плита

Сталебетонные балки состоят из прокатных стальных профилей с обетонированными полостями с преднапряженной арматурой (рис. 2).



г) обратный выгиб балки (тип II) после задания предварительного напряжения в арматурных стержнях

Рис. 2. Преднапряженные сталебетонные балки

Принятые сечения и материалы преднапряженной сталебетонной балки: двутавр 25Б1, сталь класса С245 длиной 6000 мм, арматура $\varnothing 20$ класса А500, бетон класса В30.

Численные эксперименты и результаты. Предварительное напряжение в сталебетонной балке создавалось с помощью инструмента BoltPretention. Величина преднапряжения в балках задавалась в 45000Н на каждую арматуру, исходя из расчета равных эквивалентных напряжений в верхнем и нижнем поясах двутавра, для преднапряженной сталебетонной балки с изолированной арматурой, при прогибе, равном 30 мм (график 1).

Арматура класса А500 диаметром 20 мм прокладывается вдоль стенки нижнего пояса по две в каждый двутавр. В балках II, III типов для обеспечения изолированной работы от бетона преднапряженной арматуры использована полимерная толстостенная трубка $\varnothing 26$ и толщиной 3 мм. Балки нагружались погонной распределенной нагрузкой 200 кг/м.

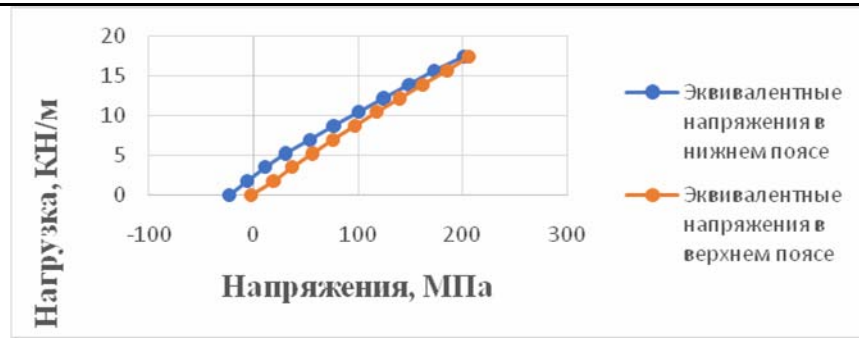
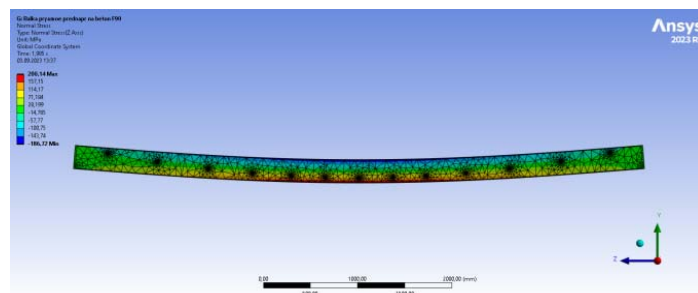
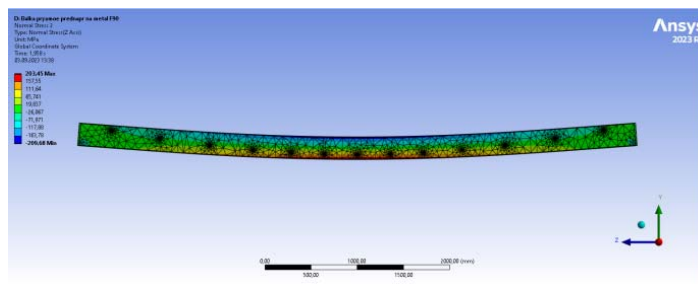


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в верхнем и нижнем поясах двутавра

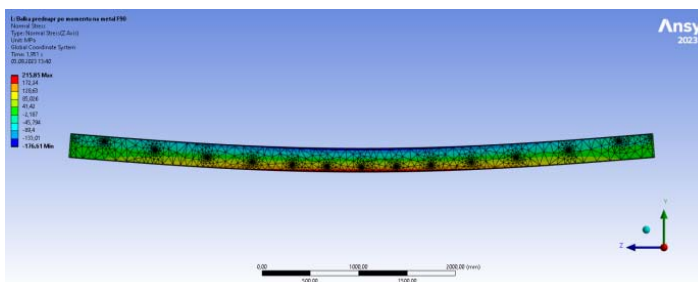
Предельная нагрузка, при которой прогиб балок составил 30 мм (предельный прогиб при $l=6$ м), составила для типа I – 15,76 КН/м, для типа II – 17,56 КН/м, для типа III – 15,85 КН/м.



а) тип I (нагрузка 15,76 КН/м)



б) тип II (нагрузка 17,56 КН/м)



в) тип III (нагрузка 15,85 КН/м)

Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние преднапряженных балок (стальная часть)

Анализ несущей способности балок показывает, что при преднапряжении балок с изолированной арматурой увеличивается их несущая способность в 1,114 раза по сравнению с балкой, у которой преднапряженная арматура работает совместно с бетоном.

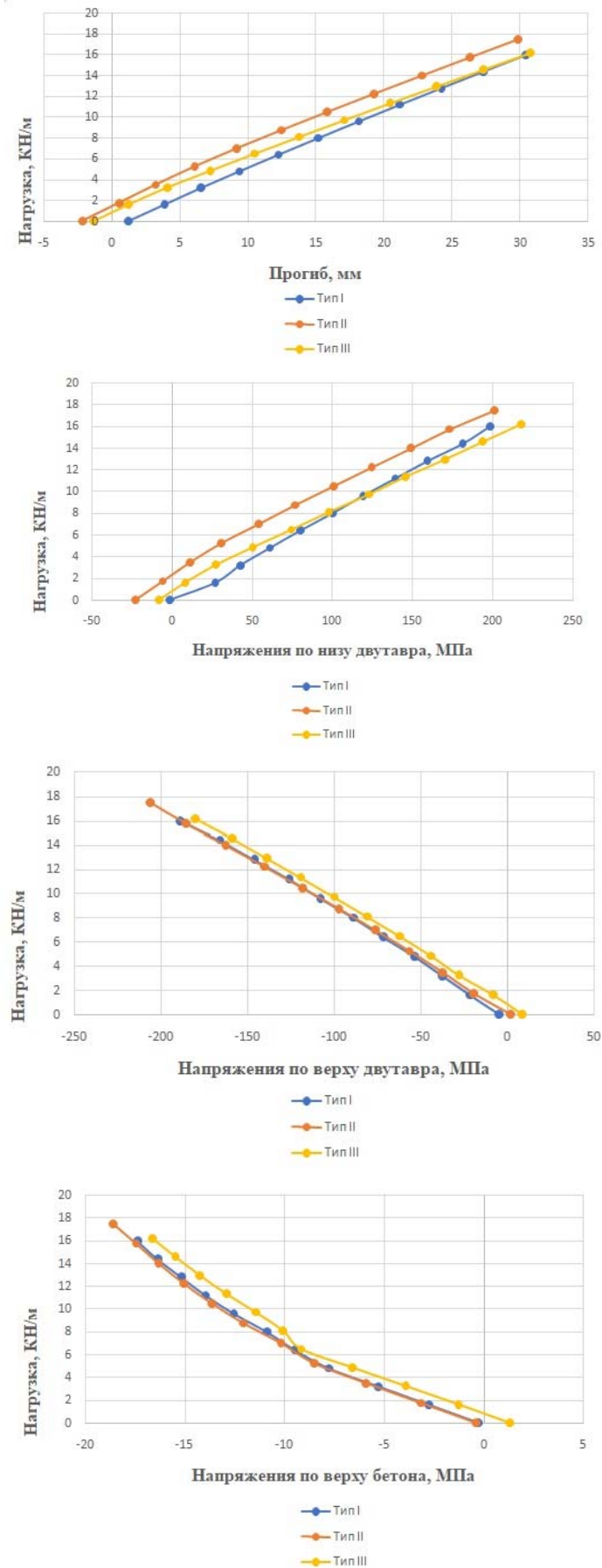


Рис. 5. Графики прогибов и напряжений сталебетонных балок

Заключение

1. Численные исследования сталебетонных балок с разными типами преднапряжения (I тип – при совместной работе бетона и преднапряженной арматуры, II тип – при работе преднапряженной арматуры без сцепления с бетоном, III тип – при размещении преднапряженной арматуры в оболочке-трубе, расположенной по огибающей эпюры изгибающих моментов), выполненные с помощью ПК Ansys, позволили выявить закономерности напряженно-деформированного состояния каждого типа сталебетонных балок. Предварительно напряженная балка с расположением арматуры в оболочке дает лучшие результаты, чем балки с преднапряженной арматурой, совместно работающей с бетоном, т.к. в опорных зонах напряжения в бетоне более чем в два раза ниже, чем при преднапряжении арматуры как в железобетонных балках.

2. Численные исследования позволили изучить особенности работы сталебетонных балок с преднапряженной арматурой, работающей без сцепления с бетоном. Размещение арматуры в оболочке позволяет увеличить несущую способность балки на 11,4 %. Исследования балок с напрягаемой арматурой по огибающей эпюры моментов необходимо продолжить, а также для исследования напряженных изгибаемых элементов необходимо запланировать экспериментальные исследования.

3. Результаты численных исследований преднапряженных сталебетонных балок с преднапряженной изолированно работающей арматурой могут быть использованы при реальном проектировании ребристых перекрытий зданий и сооружений. В зданиях и сооружениях балки чаще всего применяются как ребра в ребристых перекрытиях, поэтому исследования преднапряженных балок надо продолжить в направлении напряженно-деформированного состояния ребер в составе перекрытий.

Список литературы

1. Бабалич, В.С. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России / В.С. Бабалич, Е.Н. Андросов // *Успехи современной науки*. – 2017. – №4. – С. 205–208.
2. Джонсон, Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: проектирование сталежелезобетонных конструкций: пер. с англ. / Р.П. Джонсон. – М.: МГСУ, 2013. – 412 с.
3. Замалиев, Ф.С. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций / Ф.С. Замалиев, В.В. Филиппов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2015. – № 7. – С. 29–36.
4. Hadzalic, E. Concrete shrinkage effects in composite beam / E. Hadzalic, K. Barucija // *Construction of unique buildings and structures*. – 2014. – №11 (26). – P.85–93.
5. Champenoy, D. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges / D. Champenoy, A. Corfdir, P. Corfdir // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2014. – № 18 (3). – P. 271–292.
6. Stephen J. Hicks. Smith Stud shear connectors in composite beams that support slabs with profiled steel sheeting / Stephen J. Hicks, L. Andrew // *Structural Engineering International*. – 2014. – № 2. – P. 246–253.
7. Lawson, R.M. Pull-out forces in shear connectors in composite beams with large web openings / R.M. Lawson, J.B.P. Lim, S.O. Popo-Ola // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2013. – 87. – 48–59.
8. Johnson, R.P. Calibration of resistance of shear connectors in troughs of profiled sheeting / R.P. Johnson // *Proc. Instn. Civ. Eng., Struct. Blag.* – 2008. – 161. – 117–126.
9. Smith, Al. Strength and ductility of headed stud connectors in profiled steel sheeting / Al. Smith, GH. Couchman // *J. Construct. Steel Res.* – 2010. – 66. – P. 748–754.
10. Sun, Q. Effect of longitudinal reinforcement and prestressing on stiffness of composite beams under hogging moments / Q. Sun, Y. Yang, J. Fan, Y. Zhang, Y. Bai // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2014. – 100. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/J.JCSR.2014.04.017.

11. Lou, T. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams / T. Lou, T.L. Karavasilis // *Engineering Structures*. – 2019. – 190. – P. 116–127. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031.
12. Chen, S. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment / S. Chen, P. Gu // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2005. – 61 (4). – P. 515–530. – DOI: 10.1016/J.JCSR.2004.09.004
13. M. A. B., G. S. Y., Hamid S. Prestressed Composite Girders under Positive Moment // *Journal of Structural Engineering*. – 1990. – 116(11). – P. 2931–2951. – DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:11(2931).
14. Замалиев, Ф.С. Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных ребристых плит и балки с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном / Ф.С. Замалиев, Фекир Кахина // *Известия КГАСУ*. – 2020. – № 4 (54). – С. 23–35.
15. Замалиев, Ф.С. Натурные и численные эксперименты преднапряженных сталебетонных ребристых плит / Ф.С. Замалиев // *Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сборник статей XXII Международной научно-технической конференции*. – Пенза, 2022. – С. 78–83.

References

1. Babalich, V.S. Steel-reinforced concrete structures and the prospects for their application in Russian construction practice / V.S. Babalich, E.N. Androsov // *Advances in modern science*. – 2017. – No. 4. – P. 205–208.
2. Johnson R.P. Guidelines for designers to Eurocode 4: design of steel-reinforced concrete structures: trans. from English / R.P. Johnson. – M.: MGSU, 2013. – 412 p.
3. Zamaliev, F.S. Calculation and experimental studies of steel-reinforced concrete structures / F.S. Zamaliev, V.V. Filippov // *Industrial and civil construction*. – 2015. – No. 7. – P. 29–36.
4. Hadzalic, E. Concrete shrinkage effects in composite beam / E. Hadzalic, K. Barucija // *Construction of unique buildings and structures*. – 2014. – №11 (26). – P.85–93.
5. Champenoy, D. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges / D. Champenoy, A. Corfdir, P. Corfdir // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2014. – № 18 (3). – P. 271–292.
6. Stephen J. Hicks. Smith Stud shear connectors in composite beams that support slabs with profiled steel sheeting / Stephen J. Hicks, L. Andrew // *Structural Engineering International*. – 2014. – № 2. – P. 246–253.
7. Lawson, R.M. Pull-out forces in shear connectors in composite beams with large web openings / R.M. Lawson, J.B.P. Lim, S.O. Popo-Ola // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2013. – 87. – 48–59.
8. Johnson, R.P. Calibration of resistance of shear connectors in troughs of profiled sheet-ing / R.P. Johnson // *Proc. Instn. Civ. Eng., Struct. Blag*. – 2008. – 161. – 117–126.
9. Smith, Al. Strength and ductility of headed stud connectors in profiled steel sheeting / Al. Smith, GH. Couchman // *J. Construct. Steel Res*. – 2010. – 66. – P. 748–754.
10. Sun, Q. Effect of longitudinal reinforcement and prestressing on stiffness of composite beams under hogging moments / Q. Sun, Y. Yang, J. Fan, Y. Zhang, Y. Bai // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2014. – 100. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/J.JCSR.2014.04.017.
11. Lou, T. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams / T. Lou, T.L. Karavasilis // *Engineering Structures*. – 2019. – 190. – P. 116–127. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031.
12. Chen, S. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment / S. Chen, P. Gu // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2005. – 61 (4). – P. 515–530. – DOI: 10.1016/J.JCSR.2004.09.004

13. M. A. B., G. S. Y., Hamid S. Prestressed Composite Girders under Positive Moment // Journal of Structural Engineering. – 1990. – 116(11). – P. 2931–2951. – DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:11(2931).
14. Zamaliev, F.S. Numerical and experimental studies of prestressed steel-concrete ribbed slabs and beams with prestressed reinforcement without adhesion to concrete / F.S. Zamaliev, Fekir Kakhina // Izvestia KGASU. – 2020. – No. 4 (54). – P. 23–35.
15. Zamaliev, F.S. Full-scale and numerical experiments of prestressed steel-concrete ribbed slabs / F.S. Zamaliev // Effective building structures: theory and practice: collection of articles of the XXII International Scientific and Technical Conference. – Penza, 2022. – P. 78–83.

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Корнюхин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail kornuhin@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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Kornyukhin Anatoly Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Structures»
E-mail: kornuhin@mail.ru

РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин

Определены основные этапы эволюции расчета железобетонных элементов при действии поперечных сил в отечественных нормах проектирования; дана оценка нормативных методов расчета прочности железобетонных балок без поперечного армирования в зоне действия поперечных сил при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 6 по экспериментальным данным. На основе сравнительного анализа с опытными данными показано, что, несмотря на тенденцию к усовершенствованию отечественных нормативных методов расчета, они не имеют универсального характера и не учитывают ряда факторов, оказывающих влияние на прочность наклонных сечений при действии поперечных сил.

Ключевые слова: железобетонные балки, методы расчета, прочность, наклонное сечение, относительный пролет среза

DEVELOPMENT OF DOMESTIC METHODS OF CALCULATING THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS ON AN INCLINED SECTION

O.V. Snezhkina, A.V. Kornyukhin

The main stages in the evolution of the calculation of reinforced concrete elements under the action of shear forces in domestic design standards have been determined; An assessment is made of standard methods of calculating the strength of reinforced concrete beams without transverse reinforcement in the zone of action of transverse forces when the relative shear span a/h_0 changes from 1 to 6 according to experimental data. Based on a comparative analysis with experimental data, it is shown that despite the tendency to improve domestic standard calculation methods, they are not universal and do not take into account a number of factors that influence the strength of inclined sections under the action of shear forces.

Keywords: reinforced concrete beams, calculation methods, strength, inclined section, relative shear span

На сегодня применяются различные расчетные модели оценки прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил. Накоплена обширная база экспериментальных исследований, определяющая формы разрушения железобетонных элементов в зоне действия поперечных сил. Однако, несмотря на многочисленные исследования железобетонных конструкций, методы расчета на действие поперечных

сил, применяемые в настоящее время как в России, так и за рубежом, все еще остаются несовершенными. К основным недостаткам можно отнести: использование эмпирических выражений; отсутствие в расчетных зависимостях влияния ряда факторов, определяющих форму и вид разрушения; основанные на экспериментах расчетные зависимости подразумевают определенные границы их применения, что приводит к сомнительным результатам для ряда частных случаев, а также к затруднениям при программировании таких методик [1-4]. Ниже рассматриваются основные этапы становления теории расчета железобетонных элементов при действии поперечных сил в отечественных нормах проектирования, приводится сравнительный анализ расчета по прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил с экспериментальными данными, полученными G. Kanі (ACI). Все опытные образцы железобетонных балок (без распределенного армирования) нагружались двумя, симметрично расположенными, сосредоточенными силами, были разрушены по наклонному сечению и имели ряд постоянных параметров, таких, как: прочность бетона (270 кг/см^2), прочность и процент продольного армирования ($\mu_s=2,8 \%$), ширина балок ($b=15,25 \text{ см}$), высота балок ($h_0=27 \text{ см}$). Изменяемым фактором являлся пролет среза (относительный пролет среза $a/h_0=1\div 6$).

Расчет сечений по допускаемым напряжениям. Первоначально элементы железобетонных конструкций рассчитывались по методу допускаемых напряжений: в основу расчета положена упругая стадия работы железобетона; сечение железобетонного сечения элемента приводится к однородному упругому материалу; напряжения в бетоне и арматуре определяются по зависимостям сопротивления материалов на основании гипотезы плоских сечений и закона Гука; предельные напряжения ограничиваются допускаемыми напряжениями.

Расчет сечений по разрушающим усилиям. Недостатки метода расчета по допускаемым напряжениям привели к пересмотру теории упругого железобетона. По предложению А.Ф. Лолейта в лаборатории железобетонных конструкций ЦНИПСа под руководством А.А. Гвоздева проведен ряд экспериментально-теоретических исследований изгибаемых железобетонных элементов (ОСТ 90003–38).

Метод равновесия предельных усилий в наклонном сечении А.А. Гвоздева, М.С. Боришанского позволил перейти к оценке несущей способности элемента не по главным напряжениям, а по внутренним усилиям на стадии разрушения.

Метод расчета сечений по разрушающим усилиям основан на третьей стадии напряженно-деформированного состояния при изгибе: вместо допускаемых напряжений вводится предел прочности бетона при сжатии и предел текучести арматуры; работа бетона в растянутой зоне не учитывается. Расчет производится по двум формам разрушения элемента: по бетону сжатой зоны над наклонной трещиной (до наступления текучести в продольной арматуре) и в результате текучести продольной растянутой арматуры (с последующим разрушением бетона над трещиной).

Расчет конструкций по расчетным предельным состояниям. Метод расчета по предельным состояниям отличается от предыдущих методов расчета установлением предельных состояний конструкций (по несущей способности, по деформациям, по образованию или раскрытию трещин) и введением нескольких расчетных коэффициентов вместо общего коэффициента запаса прочности. Несущая способность элемента определяется по третьей стадии напряженно-деформированного состояния, а безопасность конструкции обеспечивается тем, что допускаемая величина эксплуатируемого усилия, действующего на элемент, принимается ниже разрушающего усилия. Величина допускаемого усилия определяется в зависимости от нагрузки, механических свойств материалов, условий работы конструкции (изменчивость факторов учитывается системой расчетных коэффициентов). Задачей расчета является обеспечение исключения предельного состояния в период эксплуатации. На основе этого метода были разработаны и введены в 1955 году «Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных конструкций» НИТУ 123–55, а с 1962 года с некоторыми уточнениями и дополнениями принимались новые нормы. По мере накопления опытных данных уточнялась лишь эмпирическая формула для опреде-

ления предельного усилия в бетоне. Развитие норм проектирования широко отражено в работах А.С. Залесова и его учеников.

Сравнение результатов, полученных с использованием методов расчета по прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил, с экспериментальными данными по нормам: ОСТ 90003–38; НиТУ 123–55; СНиП II–В.1–62; СНиП II–21–75; СНиП 2.03.01–84; СП 52–101–2003; СП 63.13330.2018 приведено в таблице и проиллюстрировано на графиках (рис. 2, 4, 6) [5–10]. Более подробно анализ и синтез сложных многокритериальных систем представлены в [11–13].

По ОСТ 90003–38, для исключения появления наклонных (косых) трещин требуется, чтобы главные растягивающие напряжения при допускаемых нагрузках не превосходили временного сопротивления бетона растяжению. Главные растягивающие напряжения определяются в месте нейтральной оси сечения, где они равны скалывающим напряжениям ($\sigma_1 = \tau$). При постоянной высоте балки скалывающие напряжения определяются по условию (1). Плечо внутренней пары сил для прямоугольных сечений рекомендуется принимать не более $7/8 h$. При расчете прочности наклонных (косых) сечений при изгибе главные напряжения при допускаемой нагрузке не должны превышать R_p , т.е.

$$\sigma_{\text{гл}} \leq R_p. \quad (1)$$

Расчет на главные растягивающие напряжения производится на основе следующих положений:

- на тех участках элемента, где главные растягивающие напряжения не превышают временного сопротивления бетона растяжению, деленного на соответствующий коэффициент запаса, т.е.

$$\sigma_{\text{гл}} \leq \frac{R_p}{k}, \quad (2)$$

отогнутая арматура и хомуты принимаются по конструктивным соображениям;

- на участках, где главные растягивающие напряжения при допускаемой нагрузке превышают величину R_p/k , работу растянутого бетона не учитывают, все усилия воспринимаются арматурой (хомутами, отгибами и продольной арматурой). Величина главных растягивающих напряжений в балках постоянного сечения определяется по соотношению

$$\sigma_{\text{гл}} = \tau = \frac{Q}{bz}, \quad (3)$$

где Q – поперечная сила; z – плечо внутренней пары сил.

По А.А. Гвоздеву, М.С. Боришанскому, в методе равновесия предельных усилий в наклонном сечении (рис. 1) работа элемента и оценка его несущей способности оцениваются по предельным внутренним усилиям, действующим на стадии разрушения, а не по главным напряжениям. По НиТУ 123–55, расчет наклонных сечений по поперечной силе производится по зависимости

$$Q \leq m[m_u m_a R_a (\sum F_0 \sin \alpha + \sum F_x) + Q_b], \quad (4)$$

где Q – расчетная поперечная сила; Q_b – проекция предельного усилия в бетоне сжатой зоны в наклонном сечении на нормаль к оси элемента.

Значение проекции предельного усилия в бетоне сжатой зоны любого наклонного сечения на нормаль к оси элемента (прямоугольного, таврового, двутаврового и кольцевого сечений) определяется как:

$$Q_b = \frac{0,15 R_u b h_0^2}{c}, \quad (5)$$

где R_u – условное временное сопротивление бетона сжатию при изгибе (значение, близкое к призменной прочности бетона); c – проекция длины наклонного сечения на ось элемента.

В развитие норм НиТУ 123-55 в СНиП II–В.1–62 вводится дополнение (является прообразом расчета по сжатой бетонной полосе): элементы прямоугольного, таврового, двутаврового и коробчатого сечений следует проектировать так, чтобы удовлетворялось условие

$$Q \leq 0,25R_u b h_0. \quad (6)$$

Схема усилий, действующих в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента при расчете его на прочность, сопоставление расчетного предельного усилия в бетоне сжатой зоны в наклонном сечении с опытными данными (СНиП II–В.1–62) приведены на рис. 1, 2.

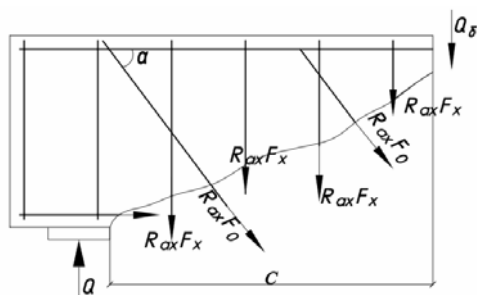


Рис. 1. Усилия в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента по СНиП II–В.1–62

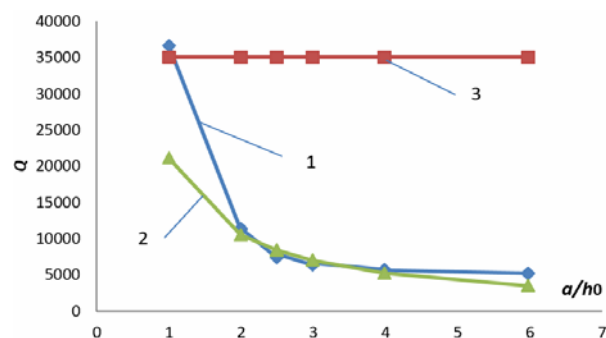


Рис. 2. Расчетные предельные усилия в наклонном сечении (СНиП II–В.1–62):
1 – Q_{test} ; 2 – Q (расчетная зависимость (5));
3 – Q (расчетная зависимость (6))

При введении в действие СНиП II–21–75 вносятся изменения в зависимости (5). Происходит замена условного временного сопротивления бетона сжатию при изгибе на расчетное сопротивление бетона осевому растяжению; вводится коэффициент k_i , значение которого определяется видом бетона ($k_3=0,8 \div 1,2$ – для балок без распределенного армирования, $k_2=1,5 \div 2$ – для балок с распределенным армированием):

$$Q_b = \frac{k_i R_p b h_0^2}{c}. \quad (7)$$

В зависимости (6) происходит замена условного временного сопротивления бетона сжатию при изгибе на расчетное сопротивление бетона осевому сжатию:

$$Q \leq 0,35R_{np} b h_0. \quad (8)$$

Наиболее значимые изменения метода расчета произошли при введении в действие СНиП 2.03.01.84. При расчете по прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента, происходит разграничение: вводится расчет на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами и расчет на действие поперечной силы по наклонной трещине.

Расчет на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами определяется зависимостью

$$Q \leq 0,3\varphi_{w1}\varphi_{b1}R_b b h_0, \quad (9)$$

где R_b – расчетные сопротивления бетона осевому сжатию; φ_{w1} – коэффициент, учитывающий влияние хомутов, нормальных к продольной оси элемента; φ_{b1} – дифференцированный коэффициент, зависящий от вида бетона.

При расчете железобетонных элементов по наклонной трещине на действие поперечной силы введено понятие длины проекции опасной наклонной трещины на продольную ось элемента c_0 , которая принимается не более $2h_0$ и не более c , а также не менее h_0 , если $c \leq h_0$. Также выполнено разделение расчета для элементов без и с распределенным армированием. Расчет железобетонных элементов по наклонной трещине на действие поперечной силы производится по следующим зависимостям:

- для балок без поперечной арматуры

$$Q_b = \frac{\varphi_{b4}(1 + \varphi_n)R_{bt}bh_0^2}{c}; \quad (10)$$

- для балок с распределенной арматурой

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2}(1 + \varphi_f + \varphi_n)R_{bt}bh_0^2}{c}, \quad (11)$$

где φ_i – коэффициенты, учитывающие влияние вида бетона; сжатых полок в тавровых и двутавровых элементах; действие продольных сжимающих сил.

Так как зависимость для определения прочности по наклонной трещине на действие поперечной силы является эмпирической, введены ограничения:

$$\varphi_{b3}(1 + \varphi_n)R_{bt}bh_0 \leq Q_b \leq 2,5R_{bt}bh_0. \quad (12)$$

Схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси железобетонного элемента, при расчете его по прочности на действие поперечной силы, сопоставление расчетного предельного усилия в бетоне сжатой зоны в наклонном сечении с опытными данными (СНиП 2.03.01.84) приведены на рис. 3, 4.

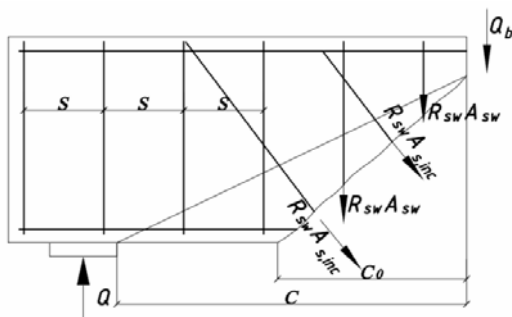


Рис. 3. Усилия в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента по СНиП 2.03.01.84)

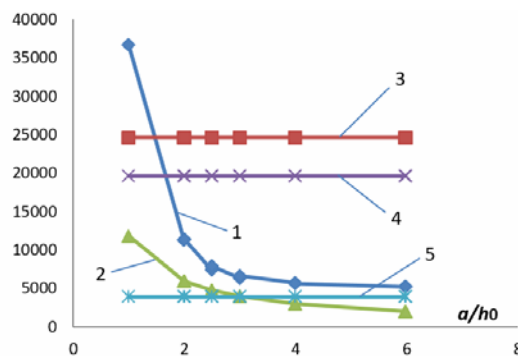


Рис. 4. Расчетные предельные усилия в наклонном сечении (СНиП 2.03.01.84):
1 – Q_{test} ; 2 – Q (расчетная зависимость (10));
3 – Q (расчетная зависимость (9));
4, 5 – ограничение (12)

Коэффициенты, введенные в расчетные зависимости (9)–(11) в СНиП 2.03.01.84, были существенно упрощены в нормах СП 52–101–2003 (и последующих редакциях СП 63.13330.12, СП 63.13330.18).

Расчет изгибаемых железобетонных элементов по бетонной полосе между наклонными сечениями производят из условия

$$Q \leq \varphi_{b1}R_{bt}bh_0. \quad (13)$$

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном в расчетном сечении:

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2}R_{bt}bh_0^2}{c}; \quad (14)$$

Q_b принимается не более $2,5R_{bt}bh_0$ и не менее $0,5R_{bt}bh_0$.

Коэффициенты φ_{b1} и φ_{b2} принимаются равными 0,3 и 1,5 соответственно.

Произошло изменение при определении проекции длины наиболее опасного наклонного сечения c ($c \leq 2h_0$ в СП 52–101–2003 и $h_0 \leq c \leq 2h_0$ в последующих редакциях).

Схема усилий при расчете железобетонных элементов по наклонному сечению на действие поперечных сил, сопоставление расчетного предельного усилия в бетоне сжатой зоны в наклонном сечении с опытными данными (СП 63.13330.2018) приведены на рис. 5, 6.

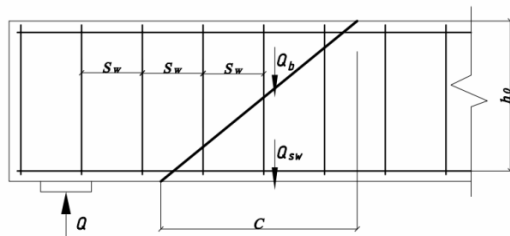


Рис. 5. Усилия в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента по СП 63.13330.2018

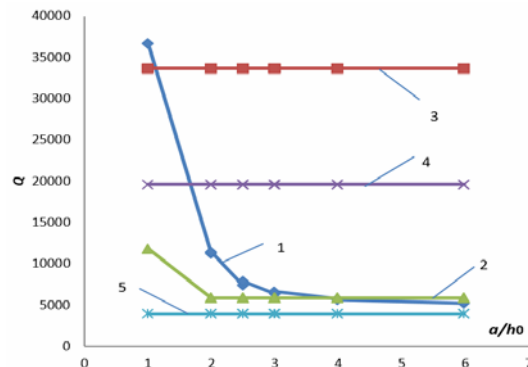


Рис. 6. Расчетные предельные усилия в наклонном сечении (СП 63.13330.2018):
1 – Q_{test} ; 2 – Q (расчетная зависимость (14));
3 – Q (расчетная зависимость (13));
4, 5 – ограничение (12) (СП 63.13330.2018)

При определении поперечной силы от внешней нагрузки допускается производить расчет наклонных сечений, не рассматривая наклонные сечения. Так, для балок без распределенного армирования

$$Q_{b1} = 0,5R_{bt}bh_0. \quad (15)$$

При определении поперечной силы в сечении на расстоянии от опоры менее $2,5h_0$ зависимость (15) умножают на коэффициент $2,5h_0/a$ (но значение Q_{b1} принимают не более $2,5R_{bt}bh_0$).

Отношение расчетного предельного усилия в бетоне сжатой зоны в наклонном сечении (ОСТ 90003–38, СНиП II–В.1–62, СНиП II–21–75, СНиП 2.03.01–84, СП 63.13330.2018) к разрушающей нагрузке

a/h_0	$Q_{test}, \text{кГ}$	Q_b/Q_{test} (ОСТ 90003–38)	Q_b/Q_{test} (СНиП II–В.1–62)	Q_b/Q_{test} (СНиП II–21–75)	Q_b/Q_{test} (СНиП 2.03.01–84)	Q_b/Q_{test} (СП 63.13330.2018)	Q_{b1}/Q_{test} (СП 63.13330.2018)
1	36673,56	0,068456	0,57595	0,257779	0,322223	0,322223	0,268519
2	11271,96	0,222724	0,936933	0,419344	0,52418	0,521818	0,436817
2	11408,04	0,220067	0,924026	0,413568	0,516959	0,515593	0,4308
2,5	7416,36	0,338513	1,139219	0,509881	0,637352	0,793099	0,531126
2,5	7779,24	0,322723	1,084047	0,485188	0,606485	0,756104	0,505404
2,5	7869,96	0,319002	1,071551	0,479595	0,599494	0,747388	0,499578
3	6373,08	0,393928	1,102694	0,493534	0,616917	0,922931	0,615513
3	6622,56	0,379089	1,063141	0,475831	0,594789	0,888163	0,592326
4	5738,04	0,437525	0,920268	0,411885	0,683633	1,025073	0,683633
4	5647,32	0,444554	0,935052	0,418502	0,694615	1,04154	0,694615
6	5216,4	0,481278	0,67539	0,302285	0,751996	1,127581	0,751996
6	5195,988	0,483168	0,677514	0,303236	0,75495	1,13201	0,75495

Базируясь на экспериментальных исследованиях, А.С. Залесов в своих работах выделил факторы, оказывающие наибольшее влияние на несущую способность железобетонных балок при разрушении по наклонному сечению, условно разделив их на две группы: первая – внешние воздействия (схема загрузки, условия опирания, вид и режим действия поперечной нагрузки, состояние окружающей среды и т.п.); вторая – конструктивные особенности самого элемента (продольное и поперечное армирование, класс бетона, размеры и форма поперечного сечения, условия анкеровки арматуры, ее сцепление с бетоном и т.д.). Однако многие из перечисленных факторов не учтены в расчетных зависимостях [14–18].

Выводы

Наиболее близкое совпадение с опытными данными (при $a/h_0=2\div 4$) отражает расчетное значение поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении, определенное по зависимости (5) СНиП II–В.1–62. Более осторожное значение показывает расчетная зависимость (10) СНиП 2.03.01–84 (запас прочности 50 % при $a/h_0=2$; 40 % при $a/h_0=2,5\div 3$; 30 % при $a/h_0=4$; 25 % при $a/h_0=6$) при условии, что Q_b принимается не менее $0,5R_{bt}bh_0$.

Пролет среза оказывает существенное влияние на трещинообразование, форму разрушения и несущую способность балки, однако в существующих нормах расчета (СП 63.13330.2018) расчетная зависимость (14) не учитывает этот параметр при $a/h_0>2$. Поперечная сила, воспринимаемая бетоном в расчетном сечении, согласно СП 63.13330.2018, определенная по зависимости (14), превышает опытные значения при $a/h_0=4\div 6$. СП 63.13330.2018 допускают производить расчет наклонных сечений при определении поперечной силы от действия внешней нагрузки по условию (15), но в них не оговаривается, в каких случаях.

Основанные на экспериментальных исследованиях расчетные зависимости не имеют универсального характера, и возможно уточнение границ их применения.

Список литературы

1. Крылов, С.Б. Модель прочности наклонных сечений балок произвольной формы/ С.Б. Крылов, В.И. Травуш, А.С. Крылов// Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – 4(27). – С. 46–63.
2. Краснощеков, Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов // Вестник СИБАДИ. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 182–192.
3. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций /Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин// Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.
4. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б.Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И.Гордеев, А.И. КОРТУНОВ, Р.А. НИКИТИН // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.
5. НТД 123-55. Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных конструкций. – М., 1955.
6. СНиП II–В.1–62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М., 1962.
7. СНиП II–21–75. Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 1976.
8. СНиП 2.03.01–84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 1985.
9. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. основные положения. – М., 2004.
10. СП 63.13330.2018. СНиП 52–01–2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., 2018.
11. Гарькина, И.А., Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.

12. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
13. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // *Architecture and Engineering*. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32
14. Залесов, А.С. Расчет прочности железобетонных балок с использованием объемных конечных элементов в развитие норм по проектированию железобетонных конструкций / А.С. Залесов, А.А. Пащанин // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2011. – №4. – С. 66–71.
15. Клюка, Е.Н. Усовершенствованная методика расчета железобетонных конструкций при изгибе с кручением / Е.Н. Клюка, А.И. Чурсин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. – № 2 (371). – С. 110–114.
16. Снежкина, О.В. Оценка методов расчета прочности железобетонных балок на действие поперечных сил / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2023. – № 4 (57). – С. 127–134.
17. Снежкина, О.В. Железобетонные балки в зоне действия поперечных сил / О.В. Снежкина, С.А. Толушов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2022. – № 3 (52). – С. 126–133.
18. Снежкина, О.В. Прочность наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента / О.В. Снежкина, А.И. Шеин, К.М. Стешин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2022. – № 4 (53). – С. 59–65.

References

1. Krylov, S.B. Model of the strength of inclined sections of beams of arbitrary shape / S.B. Krylov, V.I. Travush, A.S. Krylov // *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. – 2020. – 4(27). – P. 46–63.
2. Krasnoshchekov, Yu.V. Calculation model of resistance to lateral force of reinforced concrete bending elements // *SIBADI Bulletin*. – 2019. – Vol. 16, No. 2. – P. 182–192.
3. Kodysh, E.N. Improving the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Trekin // *Industrial and civil construction*. – 2016. – No. 6. – P. 25–28.
4. Filatov, V.B. Analysis of design models when calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams under the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 16, No. 4(3). – P. 642–645.
5. NiTU 123-55. Norms and technical conditions for the design of concrete and reinforced concrete structures. – M., 1955.
6. SNiP II-B.1-62. Concrete and reinforced concrete structures. Design standards / USSR State Construction Committee. – M., 1962.
7. SNiP II-21-75. Concrete and reinforced concrete structures. – M. 1976.
8. SNiP 2.03.01-84. Concrete and reinforced concrete structures. – M., 1985.
9. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. main provisions. – M., 2004.
10. SP 63.13330.2018. SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. – M., 2018.
11. Garkina, I.A., Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – No. 4 (37). – P. 5–11.
12. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>

13. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // *Architecture and Engineering*. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32
14. Zalesov, A.S. Calculation of the strength of reinforced concrete beams using volumetric finite elements in the development of standards for the design of reinforced concrete structures / A.S. Zalesov, A.A. Pashchanin // *Structural mechanics and calculation of structures*. – 2011. – No. 4. – P. 66–71.
15. Klyuka, E.N. Improved methodology for calculating reinforced concrete structures during bending with torsion / E.N. Klyuka, A.I. Chursin // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 2 (371). – P. 110–114.
16. Snezhkina, O.V. Evaluation of methods for calculating the strength of reinforced concrete beams under the action of transverse forces / O.V. Snezhkina, A.V. Korniyukhin // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 4 (57). – P. 127–134.
17. Snezhkina, O.V. Reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces / O.V. Snezhkina, S.A. Tolushov // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 3 (52). – P. 126–133.
18. Snezhkina, O.V. Strength of the inclined section of a bendable reinforced concrete element / O.V. Snezhkina, A.I. Shein, K.M. Steshin // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 4 (53). – P. 59–65.

УДК 69: 624:531

DOI 10.54734/20722958_2024_2_143

*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

Чуманов Александр Васильевич,
кандидат технических наук, старший
преподаватель кафедры «Механика»

*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

Chumanov Aleksandr Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Senior Lecturer
of department "Mechanics"

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

СИСТЕМА ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕХОВ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВЫХ ГАСИТЕЛЕЙ С ГИДРОЦИЛИНДРАМИ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.И. Шеин, А.В. Чуманов

В районах с сейсмически возможными воздействиями предлагается устанавливать систему перекрестных связей производственных цехов на основе двух ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия. В качестве несущих элементов можно использовать канатную арматуру, где прочность канатов помимо высокого предела прочности на растяжение дополнительно подстраховывается ходом поршня гидроцилиндра. Ленточно-тросовая (тросовая) перекрестная система связей с гидроцилиндрами одностороннего действия постепенно (с большим усилием в пружине и гидроцилиндре) вытягивается для растянутых элементов и подматывается, за счет обратного хода пружины, в «сжатых» элементах перекрестной системы. При этом работа сжато-изогнутых элементов происходит с учетом скоростей пластических деформаций. В процессе колебательных движений в гидроцилиндрах и в упругопластически изгибаемых элементах наблюдается рассеивание энергии колебаний. Приведены сравнительные расчеты вертикальных перекрестных связей двух типов: 1) жестких трубчатых стальных связей; 2) ленточно-тросовых перекрестных связей с гидроцилиндрами одностороннего действия. Показано, что работоспособность и живучесть ленточно-тросовой системы связей с гидроцилиндрами одностороннего действия существенно выше обычной жесткой системы связей.

Ключевые слова: ленточно-тросовый гаситель, гидроцилиндр одностороннего действия, сейсмическое воздействие, колебательное движение, перекрестные связи

THE SYSTEM OF CROSS-LINKS OF PRODUCTION WORKSHOPS BASED ON BAND-ROPE DAMPERS WITH ONE-SIDED ACTION HYDRAULIC CYLINDERS UNDER SEISMIC INFLUENCES

A.I. Shein, A.V. Chumanov

In areas with possible seismic impacts, it is proposed to install a system of cross-linking production workshops based on two ribbon-cable dampers with single-acting hydraulic cylinders, rope fittings are proposed as bearing elements, where the strength of the ropes, in addition to the high tensile strength, is additionally insured by the stroke of the hydraulic cylinder piston. The ribbon-

cable (cable) cross-coupling system with single-acting hydraulic cylinders is gradually (with great effort in the spring and hydraulic cylinder) stretched for stretched elements and wound, due to the reverse movement of the spring, in the «compressed» elements of the cross system. At the same time, the operation of compressed-curved elements takes into account the rates of plastic deformations. In the process of oscillatory movements in hydraulic cylinders and elastically flexibly bent elements, the energy of vibrations is dissipated. Comparative calculations of vertical cross-links of two types are given: 1) rigid tubular steel ties; 2) ribbon-cable cross-links with single-acting hydraulic cylinders. It is shown that the operability and survivability of the ribbon-cable coupling system with single-acting hydraulic cylinders is significantly higher than the usual rigid coupling system.

Keywords: band-ropе extinguisher, one – sided action hydraulic cylinders, seismic impact, oscillatory motion, cross-links

Объект, метод гашения колебаний и методика исследования

Каркас промышленных зданий, как правило, состоит из поперечных и продольных рам. Для обеспечения пространственной жесткости каркаса от торможения кранов и ветра поперечные рамы в продольном направлении соединяют вертикальными связями. При сейсмической волне, действующей вдоль цеха, нагрузка на вертикальные связи резко возрастает, т.к. переносные силы инерции, действующие на массы покрытия, имеют очень большие значения. Инерционные силы, действующие в уровне покрытия и перекрытий, частично передаются на несущие вертикальные элементы каркаса (работают на сжатие с изгибом) и на связи (работают на растяжение-сжатие). Однако обычные стальные перекрестные связи, широко применяемые в промышленном и гражданском строительстве, не обладают достаточной прочностью и жесткостью для восприятия нагрузок, возникающих при землетрясении от воздействия существенной сейсмической волны и инерционного движения большой массы покрытия. Усилия, возникающие в сжатых связях, существенно превышают значение критической силы, и эти элементы теряют устойчивость. После потери устойчивости происходит перераспределение нагрузок на растянутые связи. Перераспределение внутренних усилий увеличивает значения растягивающих напряжений. При высоких ускорениях движения грунта эти значения могут существенно превысить предел прочности материала связей, и они «разорвутся». Это, в свою очередь, приведет к увеличению амплитуды колебаний в несколько раз и возникновению риска обрушения здания.

В [1...3] рассматриваются результаты исследования применения ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия и торсионами для гашения колебаний каркасов купольного типа, в том числе для физически и геометрически нелинейных систем. Проводились исследования [4] по определению параметров модели Купера – Саймондса при динамическом нагружении с высокими скоростями деформирования и с использованием упругопластической работы стальных элементов.

В данной работе в районах с сейсмически возможными воздействиями предлагается устанавливать систему перекрестных связей производственных цехов на основе двух ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия. Ленточно-тросовая (тросовая) перекрестная система связей с гидроцилиндрами одностороннего действия будет постепенно (с большим усилием в пружине и гидроцилиндре) вытягиваться для растянутых элементов и подматываться, за счет обратного хода пружины, в «сжатых» элементах перекрестной системы. При этом работа сжато-изогнутых элементов происходит с учетом скоростей пластических деформаций. В процессе колебательных движений в гидроцилиндрах и упругопластически изгибаемых элементах будет наблюдаться рассеивание энергии колебаний.

Характерная особенность гидроцилиндра одностороннего действия в системе гашения заключается в следующем. Усилие на входном звене (штоке), возникающее при перемещении массы покрытия и передающееся от силы натяжения растянутого троса, нагнетает давление в рабочей полости гидроцилиндра. При этом часть жидкости передается в дополнительную полость. Усилие в гидроцилиндре может быть направлено только в одну сторону (рабочий ход). В противоположном направлении поршень перемещается, затягивая при этом с помощью вспомогательного клапана жидкость из дополнительной полости, только под влиянием возвратной пружины или

другой внешней силы, например силы тяжести. Поэтому поршневые гидроцилиндры одностороннего действия удобны для использования в системах управления колебательными движениями.

Для оценки эффективности предлагаемой системы связей рассмотрена рама промышленного однопролетного каркаса с тремя рядами колонн продольного направления и со связями, расположенными в среднем пролете (рис. 1). Несущие элементы – стальные двутавры №30, узлы крепления – шарнирные, вертикальные связи – квадратные трубы 70х70х3, прогоны между пролетами – квадратные трубы 100×100×4. Материал конструкций каркаса – сталь С245. Сооружение подвергалось сейсмическому нагружению, которое имитировалось гармоническим движением опорных узлов сооружения. Расчетная схема изображена на рис. 2.

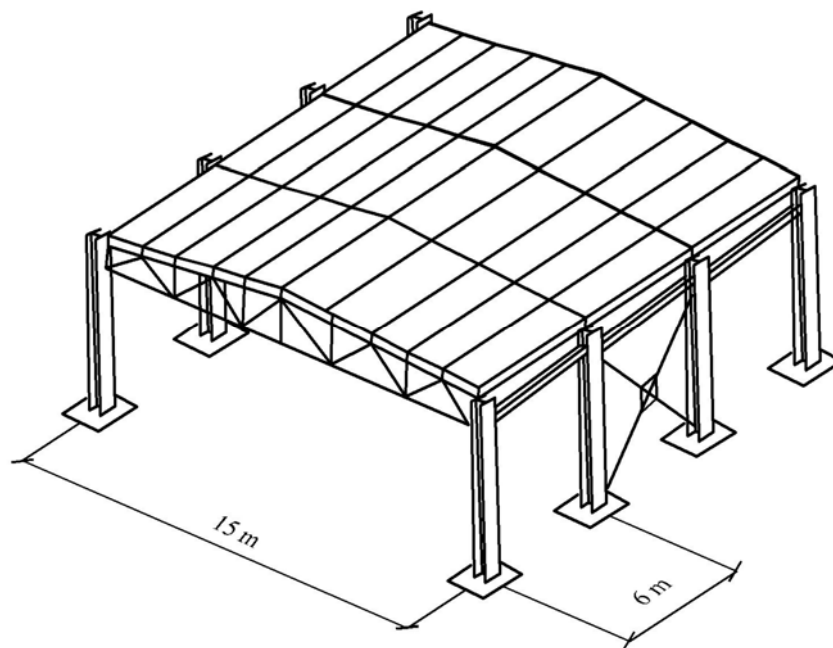


Рис. 1. Пространственная схема здания

Проведены расчет рамы по линейной модели без учета потери устойчивости связей и расчет рамы с учетом потери устойчивости и разрушения связей.

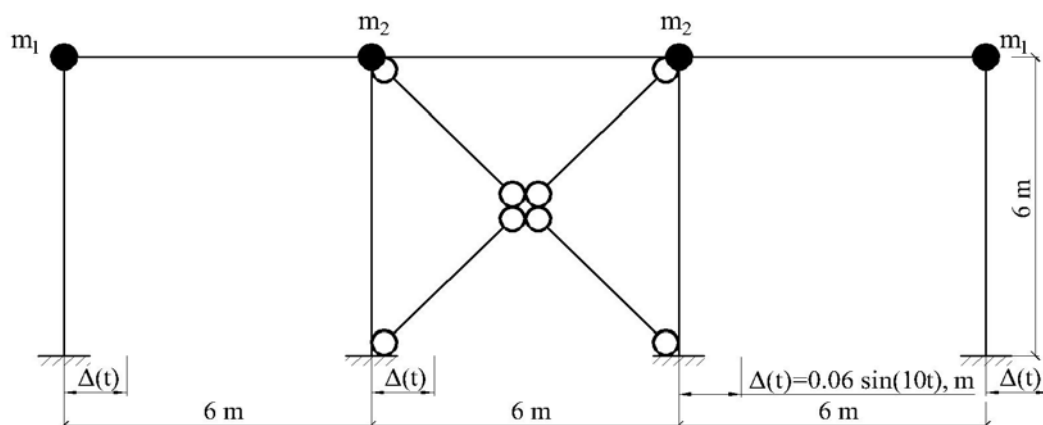


Рис. 2. Расчетная схема

Расчет производился методом конечных элементов с использованием прямого метода решения системы дифференциальных уравнений движения – метода центральных разностей. При этом проверка прочности по нормальным напряжениям выполнялась с учетом динамического нагружения и с использованием модели Купера –

Саймондса для описания упругопластической работы стальных элементов при высоких скоростях деформирования. Эмпирические параметры этой модели приняты в соответствии с [4].

$$\sigma_y^D = \sigma_y (1 + (\dot{\epsilon}/115)^{0.2}), \quad (1)$$

где σ_y^D – динамический предел текучести; σ_y – статический предел текучести; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования.

Анализ результатов численных экспериментов с трубчатыми и ленточно-тросовыми перекрестными связями

Исследовались два типа вертикальных перекрестных связей: 1) жесткие трубчатые стальные связи; 2) ленточно-тросовые перекрестные связи с гидроцилиндрами одностороннего действия. Результаты расчета изображены на рис. 3. Потеря устойчивости и разрыв связей происходят при отклонении верха колонны на 3 см в момент времени 0,21 с. После этого амплитуда колебаний возрастает в 2,6 раза. Становится возможным разрушение каркаса.

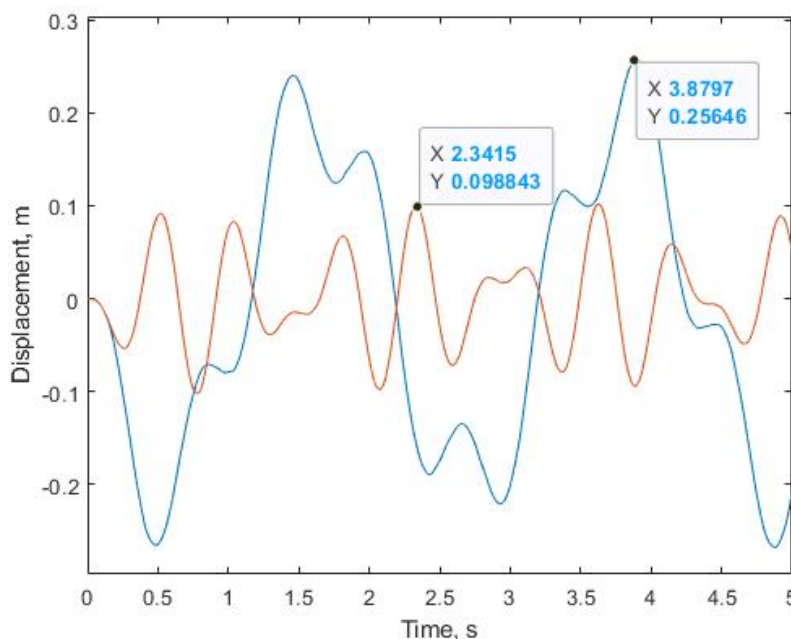


Рис. 3. Колебания верхнего узла рамы (красный график – без учета потери устойчивости, синий график – с учетом потери устойчивости)

Для восприятия инерционных сил и гашения колебаний установим перекрестную вертикальную ленточно-тросовую систему гашения колебаний с гидроцилиндрами одностороннего действия (рис. 4). В качестве несущих элементов предлагается канатная арматура, где прочность канатов помимо высокого предела прочности на растяжение дополнительно подстраховывается ходом поршня гидроцилиндра.

Подбор сечения канатов и параметров гасителя осуществляется по результатам динамического расчета рамы без гасителя. В данном расчете максимальное усилие от инерционной силы в канатной арматуре 176,75 кН. Согласно расчетной схеме (рис. 5) данное усилие не должно превышать:

$$N \leq k \cdot x + \alpha \cdot v, \quad (2)$$

где k – жесткость пружины; x – деформация пружины; α – коэффициент сопротивления движению в гидроцилиндре; v – скорость движения штока. Для расчета принимаем максимальную деформацию пружины 5 см (пружина класса III разряда 2 позиция 154 ГОСТ 13775-86, жесткость 548,8 кН / м) для ограничения амплитуды колебаний.

Максимальная скорость перемещения узла крепления 0,92 м / с. Тогда максимальный коэффициент сопротивления движению 163 кН · с / м. Коэффициент сопротивления движению α принят 30 кН · с / м. Подобрана канатная арматура К7-15,2-1670 ГОСТ Р 53772-2010 (нагрузка при условном пределе текучести 204 кН).

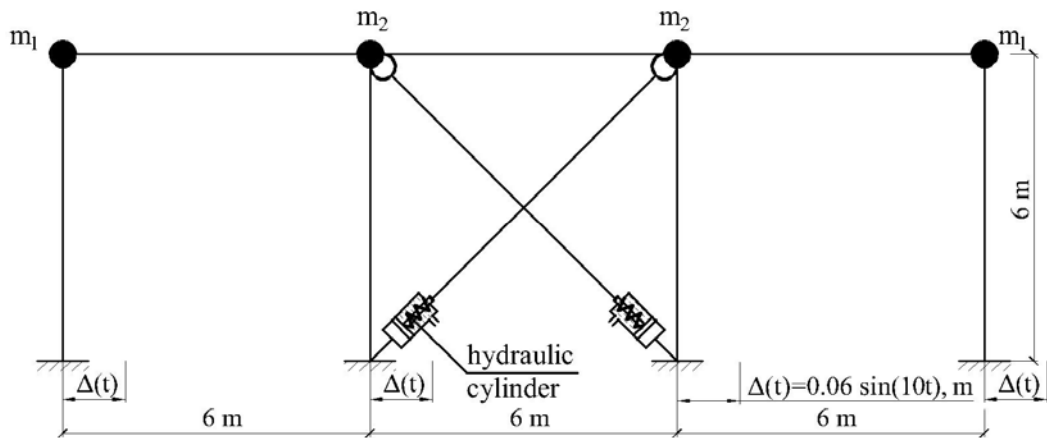


Рис. 4. Расчетная схема с гасителем

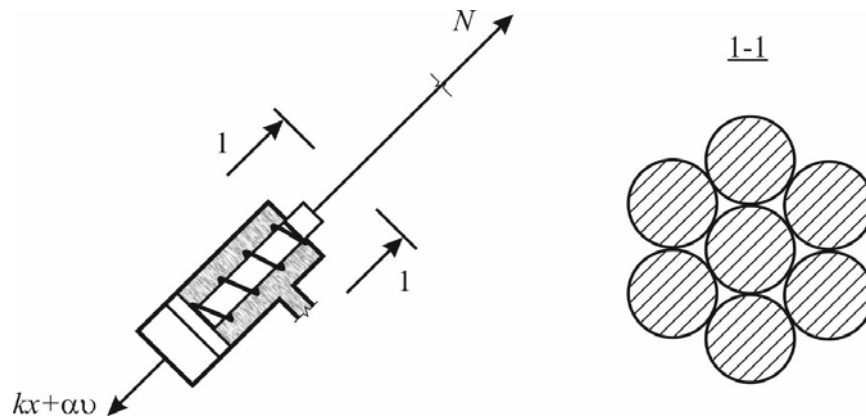


Рис. 5. К расчету гасителя

Проведен численный эксперимент с применением модели гасителя на продольной раме. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 6.

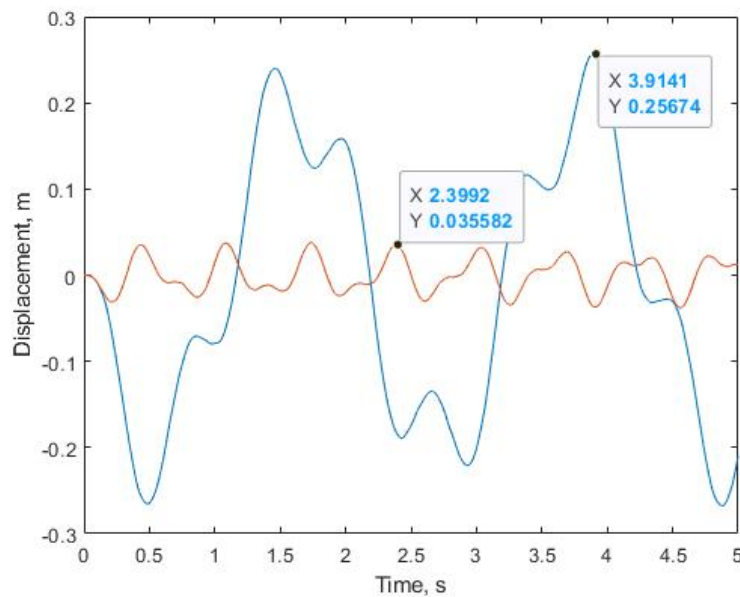


Рис. 6. Колебания верхнего узла рамы (синий график – без гасителя, красный – с гасителем)

Амплитуда колебаний в расчетной схеме с гасителем существенно меньше, чем без учета потери устойчивости связей, и на 86 % меньше, чем в расчетной схеме по модели Купера – Саймондса.

Выводы

Проведена численная проверка работы двух видов связей. Показано, что работоспособность и живучесть ленточно-тросовой системы связей с гидроцилиндрами одностороннего действия существенно выше по сравнению с обычной жесткой системой связей.

В среде «MatLab» разработано программное средство, реализующее интегрирование системы дифференциальных уравнений демпфируемого движения стержневой системы в форме МКЭ с учетом скорости упруго-пластического деформирования.

Подтвержден высокий уровень демпфирования колебаний вертикальной системой перекрестных ленточно-тросовых связей.

Показано, что ленточно-тросовый гаситель с рационально подобранными параметрами троса и гидроцилиндра позволяет снижать уровень механических колебаний промышленных каркасных сооружений на 80 %.

Список литературы

1. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065. – DOI:10.1063/5.0100292.
2. Shein, A.I. Belt vibration damping system for closed-type domes / A. Shein, A. Chumanov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 160. – P. 245–252. – DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_33.
3. Шеин, А.И. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2023.
4. Шмелев, А.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров модели упрочнения материалов Купера-Саймондса для металлических балок / А.В. Шмелев, А.В. Омелюсик, В.И. Ивченко, С.В. Хитриков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – №5. – С. 1–19.
5. Шеин, А.И. Гашение колебаний высотных сооружений. Часть 1. Современное состояние проблемы / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, М.Б. Зайцев, О.Г. Земцова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 234 с.

References

6. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065. – DOI:10.1063/5.0100292.
7. Shein, A.I. Belt vibration damping system for closed-type domes / A. Shein, A. Chumanov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 160. – P. 245–252. – DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_33.
3. Shein, A.I. Determination of parameters of a ribbon-cable extinguisher with a torsion bar or a single-acting hydraulic cylinder / A.I. Shein, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova // Regional Architecture and Engineering. – 2023.
4. Shmelev, A.V. Computational and experimental determination of parameters of the Cooper-Simonds material hardening model for metal beams / A.V. Shmelev, A.V. Omelusik, V.I. Ivchenko, S.V. Khitrikov // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2021. – No.5. – P. 1–19.
5. Shein, A.I. Damping of vibrations of high-rise structures. Part 1. The current state of the problem / A.I. Shein, S.V. Bakushev, M.B. Zaitsev, O.G. Zemtsova. – Penza: PGUAS, 2011. – 234 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

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, зав. кафедрой
«Строительные конструкции»

Болдырева Ольга Вячеславовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»

Лаврова Ольга Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Head of the Department
«Building Structures»

Boldyreva Olga Vyacheslavovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Structures»

Lavrova Olga Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building constructions»

ПРОЧНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПРИГОДНОСТЬ ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Н.Н.Ласьков, О.В.Болдырева, О.В. Лаврова

Произведен анализ возможности исследования нормативного метода расчета прочности, ширины раскрытия трещины и прогиба балки. Предложен метод оценки прочности нормальных сечений балок, который базируется на известной обобщенной расчетной модели (ОРМ), учитывает деформации в бетоне и арматуре на различных стадиях работы балок под нагрузкой. Рассмотрено влияние процента армирования и вида нагружения балок на величину остаточной прочности. На основе проведенных экспериментальных исследований предложена схема классификации трещин. Введено понятие «чрезмерно раскрытая трещина». Чрезмерно раскрытыми трещинами предложено называть трещины, развивающиеся в растянутой зоне бетона балок при появлении и нарастании пластических деформаций в продольной арматуре и отсутствии признаков разрушения сжатого бетона. Классификация развития нормальных трещин принята за основу для разработки методики оценки остаточной прочности. Разработана методика оценки эксплуатационной пригодности балок с чрезмерно раскрытыми трещинами.

Ключевые слова: железобетонные балки, допустимые трещины, чрезмерно раскрытые трещины, недопустимые трещины, остаточная прочность

DURABILITY AND SERVICEABILITY OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS

N.N. Laskov, O.V. Boldyreva, O.V. Lavrova

The article analyzes the possibility of studying normative method for calculating the strength, width of crack opening and deflection of the beam. A method for estimating the strength of normal beam sections is proposed, it is based on a well-known generalized calculation model (ORM), which takes into account deformations in concrete and reinforcement on various stages of beam operation under load. The influence of the percentage of reinforcement and the type of loading of beams on the amount of residual strength is considered. Based on the experimental studies, a crack classification scheme is proposed. The concept of «excessively opened crack (CRT)» is introduced. It is proposed to call excessively open cracks the cracks that develop in the stretched zone of concrete beams with the appearance and increase of plastic deformations in the longitudinal reinforcement and the absence of signs of destruction of compressed concrete. Classification of normal cracks development is the basis for assesment of residual strength. Methods for assesment operational suitability of beans with exessively exposed cracks.

Keywords: reinforced concrete beams, permissible cracks, exessively exposed cracks, unacceptable cracks, residual strength

В СП 63.13330.2018 [1] введен раздел 12 «Требования к восстановлению и усилению железобетонных конструкций». В нем при оценке остаточной прочности поврежденных конструкций не учитываются действительное состояние бетона и арматуры, процент армирования, характер приложения нагрузки и ряд других основных факторов. Отсутствие научного обоснования нормативного подхода к оценке поврежденных конструкций [2,3] не позволяет в полной мере оценить действительную работу конструкций.

Экспериментальные исследования, классификация трещин, а также определение границ их существования

Исследования проводились по двум основным направлениям. Балки испытывались на однократное и повторное нагружение. Выполнялись замеры ширины раскрытия трещин, прогибов, измерялись деформации в бетоне и в арматуре. Исследование на основе физического эксперимента включало в себя изучение влияния процента армирования и вида нагружения на развитие нормальных трещин. Для исследования были выбраны малый процент армирования $\mu_s = 0,45\%$ и средний процент армирования $\mu_s = 0,9\%$. В качестве основного вида нагружения принималось однократное нагружение, а также малоцикловое нагружение-разгружение до уровня постоянной нагрузки [4].

В качестве второго направления проводились исследования, касающиеся выявления чрезмерно раскрытых трещин (ЧРТ), границ допустимых и недопустимых трещин, определения их сути и области существования, т.е. за основу были выбраны направления, базирующиеся на теоретических исследованиях для разработки методики определения границ трещин, а также на экспериментальных исследованиях, необходимых для обоснования выбранной методики.

Испытано три серии балок Б-1, Б-2, Б-3 прямоугольного сечения $b \times h = 12 \times 22$ см, длиной $L = 130$ см. Балки серий Б-1 и Б-2 отличались друг от друга процентом армирования и испытывались при кратковременном нагружении. Балки серии Б-3 имели процент армирования, аналогичный балкам Б-1, и испытывались при четырехкратном нагружении-разгружении-нагружении. Опытные образцы были изготовлены из тяжелого бетона класса В30 и армировались продольной арматурой класса А400 с пределом текучести $R_s = 470$ МПа, временным сопротивлением разрыву $R_u = 640$ МПа.

Анализ результатов испытаний позволил выявить, что в балках с $\mu_s = 0,45\%$ при нагружении двумя сосредоточенными силами образуются три характерные трещины, незначительно различающиеся по характеру своего развития. В балках с $\mu_s = 0,9\%$ количество трещин в зоне чистого изгиба увеличилось до пяти, но ширина их раскрытия уменьшилась.

Следует отметить три характерных момента в развитии трещин. Начиная с изгибающего момента M_1 , равного 75 % от момента, при котором происходит разрушение (M_{test}), для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и $M_1 = 0,80M_{test}$ для балок с $\mu_s = 0,9\%$ значительно увеличиваются пластические деформации в арматуре и ширина раскрытия трещин. При $M_2 = 0,89M_{test}$ для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и $M = 0,87M_{test}$ для балок с $\mu_s = 0,9\%$ наступает новый перелом, характеризующийся более стремительным развитием деформаций в арматуре и ширины раскрытия трещин. При $M_3 = 0,95M_{test}$ для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и $\mu_s = 0,9\%$ фиксируется излом траектории нормальных трещин, после которого трещины развиваются в горизонтальном направлении. В других случаях при моменте M_3 вершины нормальных трещин четко раздваиваются. Выявлено, что в момент, соответствующий уровню M_3 , в бетоне сжатой зоны резко увеличиваются пластические деформации, появляются признаки разрушения сжатого бетона, в том числе и горизонтальные трещины. Характерно, что величина деформаций в сжатом бетоне приближается к предельной величине, $\varepsilon_{BU} = 2 \times 10^{-3}$, принимаемой нормами за величину, соответствующую прочности осевому сжатию R_{BN} .

В балках с $\mu_s = 0,45\%$, начиная с $M = 0,6M_{test}$, при дальнейшем увеличении нагрузки рост высоты трещин при $h_{CRC} = 0,75h$ практически прекращается. В балках с $\mu_s = 0,9\%$ увеличение высоты трещин происходит более равномерно и на всех этапах нагружения.

Что касается балок, испытанных в режиме нагрузка-разгрузка, следует отметить, что ширина раскрытия трещин и прогибов в балках при повторном нагружении увеличивается. Закономерность развития трещин и прогибов одинакова. При этом приращение ширины раскрытия трещин и прогибов возрастает по мере увеличения уровня разгрузки. Каждому этапу повторного нагружения соответствует увеличение и суммирование приращений ширины раскрытия трещин предыдущих этапов разгрузки-нагружения. Однако величина изгибающего момента, при котором начинается разрушение сжатой зоны бетона, для балок с однократным и повторным нагружением примерно одинакова и равна $0,95M_{test}$. Ширина раскрытия трещин, соответствующая началу разрушения сжатого бетона в балках с малым процентом армирования $\mu_s=0,45\%$ при повторном нагружении, увеличилась на $0,13\text{ мм}$.

Продолжая оценку исследуемых факторов, отметим, что при моменте $M = M_1$ независимо от процента армирования деформации в арматуре были одинаковыми. При $M = M_3$ деформации в балке с $\mu_s = 0,45\%$ увеличились примерно в 1,6 раза по сравнению с балкой $\mu_s = 0,9\%$. При моменте $M = M_3$, соответствующем началу развития пластических деформаций в арматуре, ширина раскрытия трещин в балках с $\mu_s = 0,45\%$ увеличилась в 2 раза по сравнению с балкой $\mu_s = 0,9\%$, величина прогиба – также в 2 раза. При изгибающем моменте $M = M_3$, соответствующем началу разрушения сжатого бетона, ширина раскрытия трещин в балках с $\mu_s = 0,45\%$ увеличилась в 2,5 раза, величина прогиба выросла в 2,4 раза.

Классификация трещин. На основе проведенных исследований построена схема классификации трещин для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и $\mu_s = 0,9\%$, показанная на рис. 1.

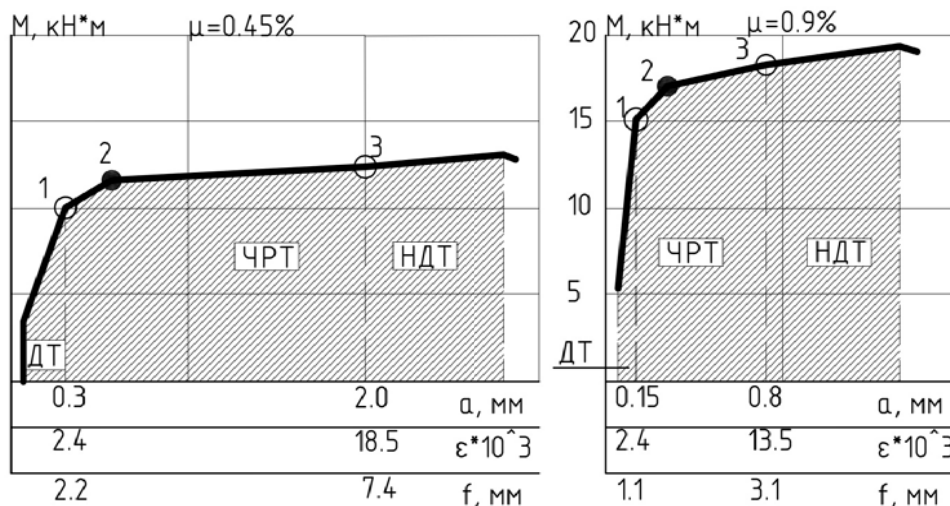


Рис. 1. Схема классификации трещин по опытным данным:
 ДТ – допустимые трещины; ЧРТ – чрезмерно раскрытые трещины;
 НДТ – недопустимые трещины

Испытания позволили выявить, что существует целая серия приращений ширины раскрытия трещин, которая свидетельствует о том, что каждый прирост пока еще не вызывает аварийного раскрытия трещин. Проявилась проблема – научиться определять длину диапазона от ширины раскрытия трещин, которую можно допустить при эксплуатации, до ширины раскрытия, свидетельствующей о начале разрушения. Таким образом, появляется необходимость ввести понятие чрезмерно раскрытой трещины. Предлагается чрезмерно раскрытыми трещинами называть трещины, развивающиеся в растянутой зоне бетона балок при появлении и нарастании пластических деформаций в продольной арматуре и отсутствии признаков разрушения сжатого бетона.

Классификация развития нормальных трещин принята за основу для разработки метода оценки остаточной прочности.

Образованию чрезмерно раскрытых трещин предшествуют трещины, которые можно назвать допустимыми трещинами (ДТ).

Испытания показали, что разрушение балок происходит при зияющем раскрытии нормальных трещин. Это позволяет считать, что существует некая область развития нормальных трещин, которые являются аварийными (НДТ). Определены начальные и конечные границы существования чрезмерно раскрытых трещин. Начальной границей ЧРТ следует считать момент появления пластических деформаций в арматуре. Воспользовавшись методикой СП, обозначим эту границу как границу, соответствующую появлению в арматуре напряжений R_{SN} . Конечной границей ЧРТ следует считать такую ширину раскрытия трещин, при которой в бетоне сжатой зоны нарастают пластические деформации, полная величина деформаций достигает предельных значений $\varepsilon_{BU} = 2 \times 10^{-3}$ и соответствует прочности при осевом сжатии R_{BN} .

С учетом обусловленных обозначений уровня нагружения определение границ ЧРТ можно регламентировать следующими моментами. Началу развития трещин ЧРТ соответствует момент M_1 , концу развития трещин ЧРТ – момент M_3 (см. рис. 1).

На основе проведенных исследований выявлено, что границы существования трещин ЧРТ в значительной степени зависят от процента армирования. При увеличении процента армирования в два раза начальная и конечная границы ЧРТ по ширине раскрытия трещин уменьшаются почти в два раза.

При повторном нагружении при четырех этапах разгрузки-нагружения зона ЧРТ увеличивается незначительно, что позволяет считать, что при небольшом числе разгрузений-нагружений конечная граница зоны ЧРТ близка к границе для балок с однократным нагружением.

Теоретический анализ и методика расчета

При разработке методики определения остаточной прочности и деформативности балок, имеющих нормальные трещины, производился анализ возможности использования нормативного метода расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогибов, принятого в СП. Оказалось, что нормативный метод нельзя использовать для оценки остаточной прочности указанных балок. На рис. 2 показан график $M - \varepsilon_B$, полученный на основе расчета по СП. Величина расчетного предельного момента соответствует моменту M_1 графика 1. Это значит, что нормативный метод расчета не позволяет учитывать работу нормальных сечений балок в области пластических деформаций бетона и арматуры.

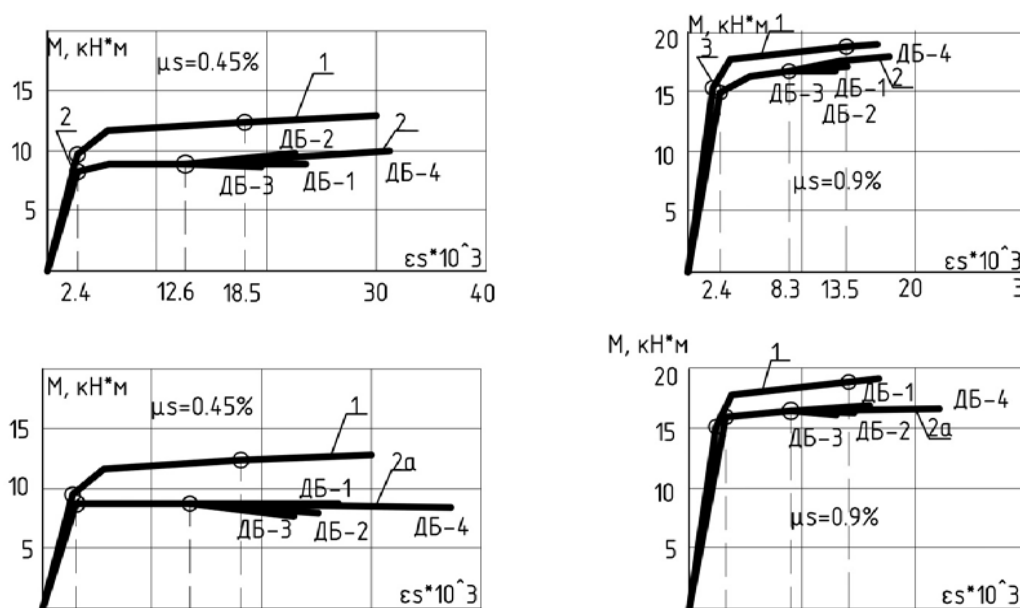


Рис. 2. Зависимости $M - \varepsilon_s$:

- 1 – по опытным данным; 2, 2а – по расчету на основе ОРМ, с использованием натуральной диаграммы $\sigma_s - \varepsilon_s$ и диаграммы Прандтля; 3 – по расчету на основе СП;
- О – границы зоны ЧРТ; ДБ-1 – ДБ-4 – графики, соответствующие различным диаграммам $\sigma_B - \varepsilon_B$

На данном этапе исследований методом оценки прочности нормальных сечений балок, который может в полной мере учесть деформации в бетоне и арматуре на различных стадиях работы балок, является метод, базирующийся на известной обобщенной расчетной модели (ОПМ), которая, в свою очередь, основывается на следующих основных положениях: уравнениях равновесия моментов и продольных сил; условиях деформирования в виде линейного поворота нормального сечения, т.е. на гипотезе плоских сечений; диаграммах деформирования бетона и арматуры.

Использование обобщенной расчетной модели при разработке методики оценки прочности и деформативности балок, имеющих нормальные трещины, производилось в следующем порядке. На первом этапе исследовались наиболее известные диаграммы состояния бетона и арматуры. Произведен расчет исследуемых балок с использованием предлагаемых диаграмм состояния материалов. Разработана методика определения остаточной прочности и эксплуатационной пригодности железобетонных балок с чрезмерно раскрытыми трещинами.

Исследовались четыре вида диаграмм состояния тяжелого бетона. Первая из них – нормативная [1], вторая и третья – известные диаграммы с ниспадающей горизонтальной ветвью, четвертая – широко распространенная диаграмма, принятая в Нормах Европейского комитета по бетону. Совместно с вышеуказанными диаграммами исследовались две диаграммы состояния арматуры – натуральная диаграмма, построенная по результатам исследования арматуры класса А400, используемой в опытных балках, а также диаграмма Прандтля, широко применяемая в практике проектирования для арматуры с физическим пределом текучести.

На основе исследований произведено сопоставление графиков зависимости $M - \epsilon_B$, полученных по расчету (см. рис. 2). Далее на основе обобщенной расчетной модели определены величины изгибающих моментов, соответствующих началу развития пластических деформаций в арматуре M_1 , началу разрушения сжатого бетона M_3 , а также момента M_{ULT} , соответствующего разрушению балки. Найдены величины соответствующих деформаций в арматуре и бетоне, произведен расчет ширины раскрытий трещин и прогибов.

Выполнено сопоставление расчетных величин изгибающих моментов, ширины раскрытия трещин и прогибов с соответствующими опытными данными, полученными при испытании балок (см. рис. 2). Следует отметить, что в балках с $\mu_s = 0,45\%$ и с $\mu_s = 0,9\%$ закономерность изменения величин моментов, полученных расчетом с использованием натуральной диаграммы состояния арматуры, полностью совпадает с закономерностью изменения опытных моментов. Расчетные величины изгибающих моментов в 1,3 раза уменьшаются по сравнению с соответствующими опытными моментами для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и в 1,1 раза для балок с $\mu_s = 0,9\%$. При использовании в расчете диаграммы $\sigma_B - \epsilon_B$ Прандтля расхождение расчетных и опытных моментов возрастает с увеличением деформаций в арматуре, поскольку расчетные моменты практически остаются на одном уровне (рис. 3). Наибольшее соотношение опытных и расчетных величин соответствует точке с $M = M_3$ на опытном графике и составляет: 1,4 – для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и 1,12 – для балок с $\mu_s = 0,9\%$. Характерно, что величина деформаций в арматуре, соответствующая опытному моменту, превышает расчетную величину в 1,4 раза для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и в 1,6 раза для балок с $\mu_s = 0,9\%$. Деформации в арматуре ϵ_s , соответствующие моменту M_1 на рассматриваемых графиках, равны опытным для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и с $\mu_s = 0,9\%$. Расчетные величины ширины раскрытия нормальных трещин и прогибов, соответствующих работе арматуры и бетона в области пластических деформаций, практически приближаются к опытным значениям.

Можно считать, что ОПМ удовлетворительно оценивает ширину раскрытия трещин и величину прогибов при развитии пластических деформаций в арматуре и бетоне.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что обобщенная расчетная модель на данном этапе является почти единственным аппаратом, способным оценить деформативные свойства бетона и арматуры при работе балок.

Произведена оценка предлагаемой классификации трещин на основе расчетной модели ОРМ. О результатах оценки можно судить по графикам (см. рис. 2).

Сопоставляя принятые границы ЧРТ по оси деформаций с границами, определенными по расчету, получаем, что начальные границы совпадают с расчетными. Конечная граница ЧРТ уменьшается в 1,4 раза для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и в 1,6 раза для балок с $\mu_s = 0,9\%$. Расчетная величина соответствующего изгибающего момента снижается в 1,3 раза, либо в 1,4 раза для балок с $\mu_s = 0,45\%$, в зависимости от используемой в расчете диаграммы состояния арматуры. Для балок с $\mu_s = 0,9\%$ расчетная величина изгибающего момента, соответствующего конечной границе ЧРТ, уменьшается в 1,10 или в 1,12 раза (см. рис. 2).

Оценивая результаты проведенного сопоставления, можно сделать выводы, что, несмотря на то что обобщенная расчетная модель занижает конечную границу области существования ЧРТ, в целом эта расчетная модель является хорошим обоснованием принятой классификации трещин.

Расчетные границы области существования ЧРТ для балок при повторном разгрузении-нагрузении незначительно увеличились в 1,03 раза по сравнению с расчетными границами для балок при однократном нагружении. При многократном нагружении, как и при длительной нагрузке, будет иметь место тенденция к увеличению области существования ЧРТ.

На основе проведенных исследований разработана методика оценки остаточной прочности и эксплуатационной пригодности железобетонных балок с нормальными трещинами. Остаточную прочность балок с нормальными трещинами предлагается определять с помощью коэффициента, который является функцией деформации арматуры, расчетных и опытных моментов:

$$\varphi = \varphi_1 - \frac{(\varphi_1 - \varphi_3) * (\varepsilon_s - \varepsilon_{s1})}{\varepsilon_{s3} - \varepsilon_{s1}}, \quad (1)$$

где $\varphi_1 = \frac{M_3^{test}}{M_1^{calc}}$; $\varphi_3 = \frac{M_3^{test}}{M_3^{calc}}$; ε_{s1} – деформации в арматуре, соответствующие M_1^{calc} ;

ε_{s3} – деформации в арматуре, соответствующие M_3^{calc} ; ε_s – деформации в арматуре, соответствующие замеренной ширине раскрытия трещины в натуральной балке.

При использовании в расчете диаграммы $\sigma_s - \varepsilon_s$ Прандтля коэффициент φ будет иметь постоянное значение.

Таким образом, предлагаемый метод оценки остаточной прочности состоит из двух этапов расчета. Первый этап заключается в определении степени аварийности трещин в соответствии с разработанной классификацией нормальных трещин. Второй этап предусматривает поочередное определение величины деформаций в арматуре ε_s и величины соответствующего момента M на основе методики обобщенной расчетной модели. При этом остаточная несущая способность вычисляется по зависимости

$$M_{ост} = M(\varphi - 1). \quad (2)$$

Предлагаемая методика оценки остаточной прочности в целом является удовлетворительной, поскольку она улавливает закономерность изменения изгибающего момента в зависимости от деформаций в арматуре, а также утверждает факт появления области существования чрезмерно раскрытых трещин.

Выводы

1. Выявлен характер развития нормальных трещин, которым соответствует нарастание пластических деформаций в арматуре и бетоне, увеличение ширины их раскрытия, однако признаков разрушения сжатого бетона не обнаруживается. Такие трещины предлагается называть чрезмерно раскрытыми трещинами, при которых не происходит разрушения балки по нормальному сечению.

2. Для разработки методики оценки остаточной прочности поврежденных балок по результатам эксперимента предложена классификация трещин по степени их аварийности. Выделено три характерных вида трещин. Трещины, при которых в арматуре преобладают упругие деформации, названы допустимыми трещинами. Основу классификации составляют чрезмерно раскрытые трещины, определение которых дано в первом выводе. Третий вид трещин, при которых происходит разрушение балки, назван недопустимыми трещинами. Таким образом, классификация трещин включает в себя три характерные зоны существования трещин.

На основе экспериментальных данных установлены начальная и конечная границы области существования чрезмерно раскрытых трещин.

3. Нормативный метод расчета не позволяет учитывать работу нормальных сечений балок в области пластических деформаций бетона и арматуры и поэтому не может быть использован при разработке метода оценки остаточной прочности балок, имеющих чрезмерно раскрытые трещины.

4. Расчетным аппаратом, позволяющим оценить остаточную прочность балок с нормальными трещинами, является обобщенная расчетная модель, которая основывается на трех положениях: на уравнениях равновесия моментов и продольных сил; на условии деформирования в виде линейного поворота нормального сечения, т.е. на гипотезе плоских сечений; на диаграммах деформирования бетона и арматуры, связывающих напряжения и деформации вплоть до их предельных значений.

5. Выявлено, что для расчета остаточной прочности балок по обобщенной расчетной модели предпочтительными являются диаграмма состояния бетона, предложенная НИИЖБ, а также одна из двух диаграмм состояния арматуры – натуральная либо диаграмма Прандтля.

6. Закономерность изменения моментов, полученных расчетом, полностью соответствует закономерности, выявленной в результате экспериментальных исследований. Расчетные изгибающие моменты в 1,3 раза меньше опытных величин для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и в 1,1 раза меньше для балок с $\mu_s = 0,9\%$. При использовании диаграммы $\sigma_s \sim \varepsilon_s$ Прандтля расхождение расчетных и опытных величин соответственно увеличивается в 1,4 и в 1,12 раза. Расчетная величина деформаций в арматуре, соответствующая конечной границе чрезмерно раскрытых трещин, уменьшается по сравнению с величиной, установленной в опытах, в 1,4 раза для балок с $\mu_s = 0,45\%$ и в 1,6 раза для балок с $\mu_s = 0,9\%$. Несмотря на указанные расхождения, в целом расчетная модель является хорошим обоснованием принятой классификации трещин.

7. Разработана методика оценки остаточной прочности и эксплуатационной пригодности балок с нормальными трещинами, суть которой заключается в определении остаточной прочности путем введения в расчет коэффициента φ , который предлагается определять по расчетной зависимости (1), основывающейся на сопоставлении расчетных и опытных изгибающих моментов.

8. Предлагаемая методика оценки остаточной прочности состоит из двух этапов расчета. Первый этап заключается в определении степени аварийности трещин в соответствии с разработанной классификацией нормальных трещин. Второй этап предусматривает определение соответствующего момента по обобщенной расчетной модели ОРМ. При этом остаточная несущая способность вычисляется по зависимости $M_{ост} = M(\varphi - 1)$.

9. Несмотря на то что обобщенная расчетная модель занижает границу области ЧРТ, предлагаемая методика оценки остаточной прочности в целом является удовлетворительной, поскольку она улавливает закономерность изменения изгибающего момента в зависимости от деформаций в арматуре. Весьма важным является то, что методика утверждает факт появления области существования чрезмерно раскрытых трещин и позволяет определять величину остаточной прочности балок с нормальными трещинами.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., 2019 – 161 с.
2. Болдырева, О.В. Методы определения трещин в железобетонных балках / О.В. Болдырева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2021. – № 3 (296). – С.2–11.
3. Лаврова, О.В. Методика расчета прочности железобетонных коротких балок, усиленных на основе каркасно-стержневой модели / О.В. Лаврова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4. – С.98–103.
4. Баранова, Т.И. Оценка прочности и эксплуатационной пригодности железобетонных балок с нормальными трещинами / Т.И. Баранова, И.С. Гучкин, В.И. Муленкова // Инженерные проблемы современного железобетона: сборник статей Международной научно-технической конференции по бетону и железобетону. – Иваново, 1995. – С.72–80.

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. – М., 2019. – 161 p.
2. Boldyreva, O.V. Methods for determining cracks in reinforced concrete beams / O.V. Boldyreva // Construction Mechanics and calculation of structures». – 2021. – № 3 (296). – P.2–11.
3. Lavrova, O.V. Methodology for calculating the strength of reinforced concrete short beams reinforced on the basis of a frame-core model / O.V. Lavrova // Regional Architecture and Engineering. – 2019. – No.4. – P.98–103.
4. Baranova, T.I. Assessment of strength and operational suitability of reinforced concrete beams with normal cracks / T.I. Baranova, I.S. Guchkin, V.I. Mulenkova // Engineering problems of modern reinforced concrete: Collection of articles of the International scientific and technical Conference on concrete and reinforced concrete. – Ivanovo, 1995. – P.72–80.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 519.87 : 697.956

DOI 10.54734/20722958_2024_2_157

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

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

Кошев Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Information and Computing
Systems», Full member of the New York
Academy of Sciences

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information Support
Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА ОТ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В. Кузина, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева, А.И. Ерёмкин

Методом математического моделирования определяются параметры восходящего конвективного потока нагретого воздуха в пристенном конвективном потоке от поверхности отопительного прибора в зале богослужения. Для решения задачи используется упрощенная математическая модель, когда пристенный конвективный поток настигается на вертикальную охлажденную поверхность. Из результатов расчетов, согласующихся с экспериментальными исследованиями, следует, что скорость восходящего конвективного потока воздуха существенно возрастает только в области, расположенной непосредственно над обогревательным прибором, и при отдалении от него на достаточно небольшое расстояние стремится к нулю. Та же тенденция наблюдается и относительно распределения температуры воздуха над отопительным прибором.

Ключевые слова: зал богослужения, отопительный прибор, математическое моделирование, восходящий поток воздуха, конвективный поток, температура и скорость воздуха, ламинарный и турбулентный слои

DETERMINATION OF CONVECTIVE FLOW PARAMETERS FROM A HEATER BY MATHEMATICAL MODELING METHOD

V.V. Kuzina, A.N. Koshev, I.K. Ponomareva, A.I. Eremkin

The parameters of the upward convective flow of heated air in the wall convective flow from the heater surface in the worship hall are determined by the method of mathematical modeling. To solve the problem a simplified mathematical model is chosen when the wall convective flow is overlaid on a vertical cooled surface. It follows from the results of calculations, consistent with experimental studies, that the velocity of the upward convective air flow increases significantly only in the area located directly above the heater and tends to zero at a sufficiently small distance from it. The same tendency is observed with respect to the air temperature distribution above the heater.

Keywords: worship hall, heating device, mathematical modeling, upward air flow, convective flow, air temperature and velocity, laminar and turbulent layers

Анализ движения воздуха в зале богослужения и проводимые нами исследования показывают [1-4], что нагретый и охлажденный конвективные потоки вдоль тепловоспринимающей внутренней поверхности стены движутся во взаимно противоположном направлении. Охлажденный поток направляется вниз, а нагретый – вверх, оказывая взаимное торможение скорости движения конвективных потоков.

Целью исследования является определение параметров конвективного потока воздуха в пристенном конвективном потоке, образованном от нагретой поверхности отопительного прибора.

Для расчета профиля избыточных температур $t_{изб}$, °С, и профиля скоростей V , м/с, в поперечном сечении полуограниченного, настилающегося конвективного потока воспользуемся аналогией известного [4–6] метода расчета воздушной струи, истекающей из щелевидных отверстий вдоль охлажденной или нагретой поверхности стены. Известно, если щелевидное отверстие, через которое подается вверх струя нагретого воздуха, расположено вдоль вертикальной стены, тогда струя воздуха, как и конвективный поток, носит название плоской, полуограниченной, настилающейся.

Аналогичное название характерно и для нашего случая с пристенным плоским восходящим конвективным потоком, образованным вдоль внутренней поверхности наружной стены от нагретой поверхности отопительного прибора.

Структура пристенного конвективного потока является достаточно сложной за счет образования сложного профиля скорости и температуры воздуха в потоке [7-9]. Его толщина и количество присоединенного воздуха по мере движения вверх монотонно от плоскости к плоскости возрастают.

В каждом поперечном сечении пристенного конвективного потока образуется сложный профиль скоростей и температур. Имеют место три слоя нагретого воздуха: ламинарный слой движущегося воздуха вдоль стены малой толщины; турбулентный пристенный слой движущегося воздуха толщиной больше ламинарного; наиболее отдаленный от поверхности стены вихревой (турбулентный) слой.

Ограничимся упрощенной математической моделью, когда пристенный конвективный поток настилается на вертикальную охлажденную поверхность.

Представим, что температура $\tau_{в.п}$, °С, охлажденной поверхности ниже температуры воздуха в помещении $t_{в}$, °С, на величину $t_{изб} = t_{в} - \tau_{в.п}$. Для плоской пристенной струи достаточно двух координат: вертикальной координаты y , направленной вверх вдоль стены, и горизонтальной x , направленной от стены в сторону помещения. Начало координат поместим в точку A верха отопительного прибора (рис. 1, линия AE).

В расчетах предусматривается не учитывать толщину пограничного ламинарного и турбулентного пристенных слоев.

Рассмотрим схему [1] распространения настилающегося воздушного конвективного потока, образованного за счет теплоты отопительного прибора тепловоспринимающей поверхностью стены (рис. 2).

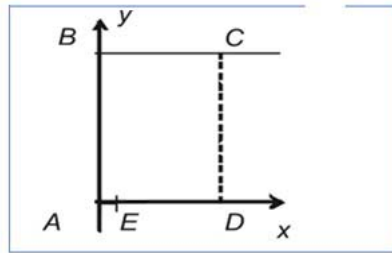


Рис. 1. Схема расчётной области

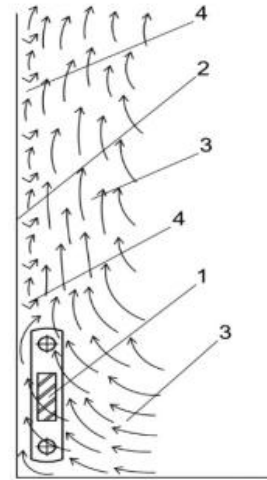


Рис. 2. Схема движения нагретого воздуха в пристенном конвективном потоке от поверхности отопительного прибора:
1 – отопительный прибор; 2 – охлажденный конвективный поток; 3 – загрязненный воздух из помещения; 4 – нагретый пристенный конвективный поток

При составлении моделирующих уравнений и проведении численных расчетов используем классические законы сохранения количества движения и массы, выражением которых являются стационарные уравнения: уравнение Навье – Стокса, уравнение неразрывности и температурного поля [4, 5]. Для рассматриваемого нами случая справедливо:

$$V_y \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial y} + k_1 \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

$$V_y \frac{\partial T}{\partial x} + V_x \frac{\partial T}{\partial y} + k_2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) $V = (V_x, V_y)$ – вектор скорости движения нагретого воздуха; V_x – горизонтальная составляющая V ; V_y – вертикальная составляющая V ; $T(x, y)$ – избыточная температура воздуха в пристенном пространстве, $T = t - t_b$ (t и t_b – соответственно, температура воздуха в любой точке пристенного пространства и температура окружающего воздуха); $k_1 = g\beta\theta l^3/\mu$, $k_2 = \alpha/\mu$ (g – ускорение свободного падения; β – коэффициент температурного расширения воздуха; $\theta = t_{ct} - t_b$ – разность между температурой вертикальной стены и температурой окружающего воздуха; μ – эффективный коэффициент кинематической вязкости; α – эффективный коэффициент теплопроводности).

Область расчетов (см. рис. 1), моделирующую схему пристенного движения нагретого от отопительного прибора воздуха, можно представить в виде прямоугольника с достаточно удаленными друг от друга противоположными сторонами, где AB – линия, соответствующая стене с прилегающим к ней источником тепла (отрезок AE); AD – линия, соответствующая полу помещения; BC и CD – линии, соответствующие символическим потолку и противоположной стене помещения.

Систему дифференциальных уравнений (1) – (3) необходимо дополнить естественными граничными условиями, характеризующими поведение искомых функций V_x , V_y , T на границах области расчетов:

- 1) при $x = A$, $A \leq y \leq B$: $V_x = V_y = 0$; $T = \theta = t_{ct} - t_b$;
- 2) при $x \rightarrow \infty$ ($x = D$), $D \leq y \leq C$: $V_x = V_y = 0$; $T = 0$;
- 3) при $y = A$, $A \leq x \leq E$: $V_x = 0$, $V_y = V_0$; $T = t_n$ – температура верхней поверхности обогревателя; V_0 – скорость подачи струи ($V_0 = 0$ при обогревателе типа «калорифер»);
- 4) при $y = A$, $a \leq x$: $V_x = 0$, $V_y = 0$; $T = 0$;
- 5) при $y \rightarrow \infty$ ($y = B$), $A \leq x \leq E$: $V_x = 0$, $V_y = 0$; $T = 0$.

При проведении расчетов были приняты следующие размеры расчетной области: $AE = 0,1$ м; $ED = 1$ м; $AB = DC = 1$ м; $BC = 1,1$ м.

Значения параметров и констант выбраны следующими: $g = 10$, м/с²; $\beta = 3,67 \cdot 10^{-3}$, 1/К; $\mu = 15,6 \cdot 10^{-6}$, м²/с; $\alpha = 0,0257$, Вт/(м·К); $\rho = 1,205$ кг/м³.

Следовательно, $k_1 = g\beta\theta l^3 / \mu = 3,67 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 1^3 / 15,6 \cdot 10^{-6} = 2,352 \cdot 10^3$ при $l = 1$; $k_1 = 2,352$ при $l = 0,1$; $k_2 = \alpha / \mu = 0,0257 / 15 \cdot 10^{-6} = 1,647 \cdot 10^3$. Граничные условия: $p_t = 1$; $V_0 = 0$; $t_{ct} = 10$; $t_b = 20$.

Для аппроксимации производных использовалась регулярная квадратная сетка с шагом h (рис. 3).

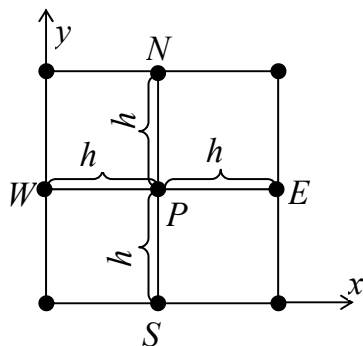


Рис. 3. Сетка разностной аппроксимации

Первые и вторые производные неизвестных функций были представимы в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial x} \approx \frac{C(E) - C(W)}{2h}; \quad \frac{\partial C}{\partial y} \approx \frac{C(S) - C(N)}{2h}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx 2 \cdot \left[\frac{C(E) - C(P)}{h^2} - \frac{C(W)}{2h^2} \right]; \quad \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx 2 \cdot \left[\frac{C(S) - C(P)}{h^2} + \frac{C(N)}{2h^2} \right], \quad (5)$$

где E, W, S, N – узлы сетки; C – символьное обозначение неизвестной функции.

Используя разностные представления частных производных (4), (5), можно выписать систему линейных алгебраических уравнений, соответствующих системе уравнений (1) – (3), общий вид которой

$$\bar{A} \cdot \bar{C} = \bar{f}, \quad (6)$$

где $\bar{A}$ – матрица коэффициентов при векторе неизвестных $\bar{C}$, соответствующем векторам разностного представления неизвестных функций V_x, V_y, T ; $\bar{f}$ – вектор-столбец свободных членов. Полная развернутая запись системы линейных алгебраических уравнений (6) в данной работе не приводится в силу ее громоздкости и нежелания перегружать статью не сложными, но тяжелыми для прочтения выражениями и уравнениями.

Для решения системы (6) был выбран метод Зейделя, для реализации которого система (6) была приведена к виду

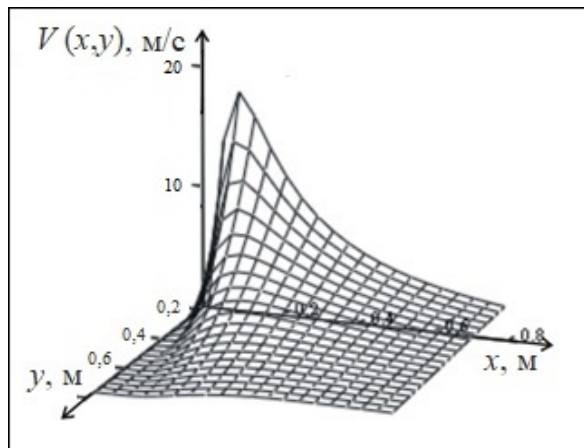
$$\bar{C}^{n+1} = \bar{D}^{-1} (-\bar{M} \cdot \bar{C}^{n+1} - \bar{N} \cdot \bar{C}^n + \bar{f}), \quad (7)$$

где $\bar{C}^n$ – вектор неизвестных, найденный на n -й итерации; $\bar{D}$ – диагональная матрица; $\bar{M}$, $\bar{N}$ – соответственно нижняя и верхняя треугольные матрицы, такие, что $\bar{A} = \bar{D} + \bar{M} + \bar{N}$. Численная реализация метода Зейделя для рассматриваемого класса задач показала его хорошую сходимость к решению за приемлемое количество вычислительных итераций.

Отметим, что для получения результатов расчетов с достаточной точностью расчетную область $ABCD$ необходимо покрывать разностной сеткой большой размерности. Это приводит к системам линейных алгебраических уравнений больших порядков (500 уравнений и более). Для решения таких систем матрицы коэффициентов преобразовывались в одномерные массивы без нулевых элементов, с указанием в векторной форме номеров этих элементов (номера строки и столбца, где расположен элемент). После этого использовалась одна из стандартных процедур для быстрого решения по методу Зейделя из библиотеки стандартных подпрограмм для современной версии алгоритмического языка *Fortran*.

Результаты расчетов распределения скорости воздуха $V(x,y)$ и температуры воздушной среды $T(x,y)$ в поперечном сечении пристенного конвективного потока приведены на рис. 4, 5.

а



б

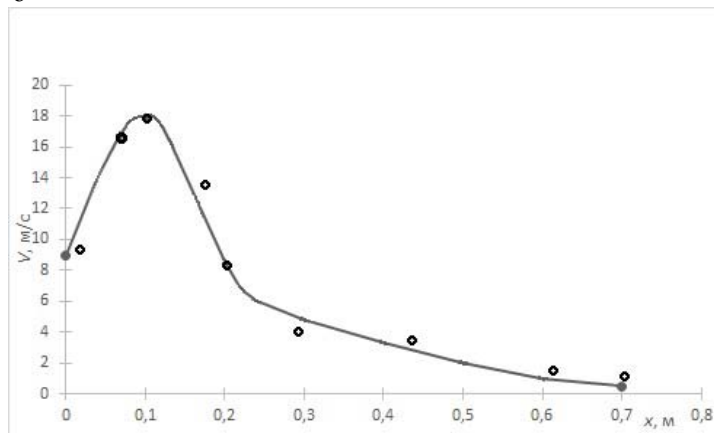


Рис. 4. Изменение скорости $V(x,y)$ в плоскости вертикального сечения пристенного пространства помещения над отопительным прибором:

а – по высоте y и горизонтальной координате x ;

б – при $h=10$ см (линия – результаты расчета, точки – результаты эксперимента)

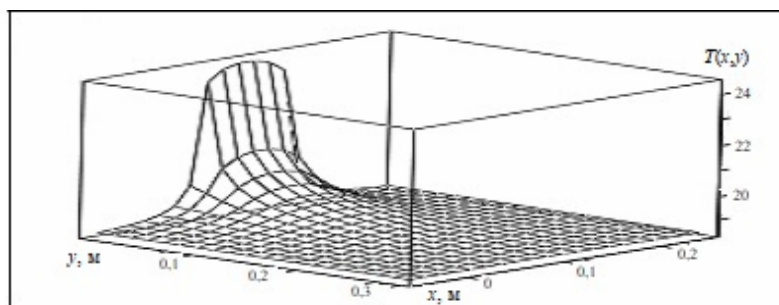


Рис. 5. Изменение температуры $T(x,y)$ в плоскости вертикального сечения пристенного пространства помещения над отопительным прибором по высоте y и горизонтальной координате x

Сравнение результатов расчетов и экспериментальных измерений, приведенных в монографии [1], показывает хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Из результатов расчетов следует, что скорость восходящего конвективного потока воздуха существенно возрастает только в области, расположенной непосредственно над отопительным прибором, и при отдалении от него на достаточно небольшое расстояние стремится к нулю. Та же тенденция наблюдается и относительно распределения температуры воздуха над отопительным прибором. Причем и в том, и в другом случае выравнивание конвекции воздуха и температуры с движением воздуха и его температурой в глубине помещения для выбранных условий расчетов происходит уже на расстоянии менее одного метра от отопительного прибора. То же самое касается и распределения скорости и температуры по высоте помещения.

Данная математическая модель позволяет рассчитать значения температуры и скорости воздуха в поперечном сечении конвективного потока, необходимого для обеспечения температурного режима на внутренней поверхности наружной стены.

Очевидно, что для более существенного обогрева как стены, так и глубины помещения необходимо усовершенствовать свойства нагревателя и использовать отопительные приборы большей мощности и, возможно, с принудительной конвективной подачей теплоты. В то же время следует предусмотреть мероприятия для предотвращения обтекания внутренней поверхности наружной стены загрязненным воздушным конвективным потоком от отопительного прибора.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. Принципы совершенствования климатизации в православных культовых сооружениях: моногр. / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин. – Пенза: ПГУАС, 2023. – 240 с.
2. Кузина, В.В. Расчет конвективной диффузии технического углерода при горении свечей в храме в условиях вертикальной вытяжки воздуха / В.В. Кузина, Н.А. Кошев, И.К. Пономарева, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 149–158.
3. Кузина, В.В. Математическое моделирование распределения конвективного потока над компактно расположенными тепловыми источниками / В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 75–80.
4. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 145 с.
5. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – СПб.: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2000. – 400 с.

6. Кузина, В.В. Математическое моделирование диффузионного распределения продуктов горения свечей в храме / В.В. Кузина, А.И. Ерёмкин, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 180–186.
7. Лыков, А.В. Возбуждение конвекции нагревом сверху / А.В. Лыков, Б.М. Берковский, В.Е. Фертман // Progress in Heat and Mass Transfer, vol. 4, Pergamon Press. – 1969. – 425 с.
8. Галиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Галиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 296 с.
9. Боголюбов, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Боголюбов. – СПб.: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2006. – 400 с.

References

1. Eremkin, A.I. Principles of the climatization improvement in the orthodox religious buildings: monograph / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin. – Penza: PGUAS, 2023. – 240 с.
2. Kuzina, V.V. Calculation of convective diffusion of carbon black during candle burning in a temple under the conditions of vertical air extraction / V.V. Kuzina., N.A. Koshev, I.K. Ponomareva, A.N. Koshev // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – № 4 (57). – P. 149–158.
3. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of convective flow distribution over compactly located thermal sources / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – № 1 (50). – P. 75–80.
4. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in a room / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 145 p.
5. Bogoslovsky, V.N. Building thermophysics / V.N. Bogoslovsky. – SPb.: AVOK SEVERO-ZAPAD, 2000. – 400 p.
6. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of the diffusion distribution of the candle burning products in the temple / V.V. Kuzina, A.I. Eryomkin, A.N. Koshev, I.K. Ponomareva // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – № 3 (56). – С. 180–186.
7. Lykov, A.V. Excitation of Convection by Heating from Above / A.V. Lykov, B.M. Berkovskiy, V.E. Fertman // Progress in Heat and Mass Transfer, vol. 4, Pergamon Press. – 1969. – 425 p.
8. Galiev, V.N. Aerodynamics of ventilation / V.N. Galiev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 296 p.
9. Bogolyubov, V.N. Building thermophysics / V.N. Bogolyubov. – SPb.: AVOK SEVERO-ZAPAD, 2006. – 400 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2024_2_164

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru
Тюменский индустриальный университет
Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Белова Лариса Владимировна,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Начертательная геометрия и графика»,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru
Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru
Industrial University of Tyumen
Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Belova Larisa Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics», Professor of the department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru
Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА, ВСПЛЫВАЮЩИХ В ЧИСТОЙ ВОДЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований закономерностей изменения термодинамических характеристик пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в различных режимах. Определены значения основных термодинамических показателей, характеризующих процессы всплывания пузырьков воздуха в турбулентном режиме и режиме квадратичного закона сопротивления. Получены математические зависимости, описывающие процессы всплывания пузырьков воздуха в различных режимах.

Ключевые слова: критерий Рейнольдса, термодинамические характеристики, режим всплывания, удельная объемная энергия, коэффициент формы, коэффициент дисперсности

THEORETICAL ANALYSIS OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIR BUBBLES FLOATING IN CLEAN WATER IN VARIOUS MODES

S.Y. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the patterns of changes in the thermodynamic characteristics of air bubbles floating in clean water in various modes are presented. The values of the main thermodynamic parameters characterizing the processes of air bubbles popping in the turbulent regime and the regime of the quadratic law of resistance are determined. Mathematical dependences describing the processes of air bubbles popping in various modes are obtained.

Keywords: Reynolds criterion, thermodynamic characteristics, floating mode, specific volumetric energy, shape coefficient, dispersion coefficient

В работах [1, 2] представлены результаты теоретических исследований закономерностей изменения кинетических и динамических характеристик пузырьков воздуха и тонкослойных сферических тел, всплывающих в чистой воде в различных режимах. Динамические и кинетические характеристики исследуемой системы не позволяют адекватно оценить степень вероятности ее перехода из одного состояния в другое. Определить вероятность перехода системы из одного состояния в другое можно с помощью термодинамического подхода, в рамках которого используется понятие удельной внутренней энергии элементов системы и ее изменение в момент перехода системы в другое состояние.

Вид режимов свободного всплывания тел в жидкости позволяет определить численное значение безразмерного комплекса – критерия Рейнольдса, являющегося мерой соотношения величин силы инерции и силы вязкого трения:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (1)$$

где V – средняя величина скорости всплывания тела в жидкости, м/с; d – диаметр тела, м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

Поскольку поперечное сечение наибольшей площади ω , м², сферического тела и пузырька воздуха всегда представляет собой круг, то его диаметр d , м, является основным линейным размером.

Наряду с основным линейным размером d , м, также различают характерный размер тела h , м, величина которого определяется как отношение объема тела W , м³, к максимальной величине площади его поперечного сечения ω , м², и дисперсный размер тела δ , м, величина которого определяется как отношение объема тела W , м³, к площади его поверхности f , м² [1, 2].

Геометрические особенности поверхности тела характеризуют коэффициент его формы K_Φ , величина которого определяется как отношение площади поверхности f , м², к площади поперечного сечения ω , м², и коэффициент дисперсности K_d , величина которого определяется как отношение диаметра d , м, к дисперсному размеру δ , м [1, 2].

Величину объема тела находим по формуле

$$W = h \cdot \omega = \delta \cdot f = \frac{K_\Phi}{K_d} \cdot d \cdot \omega = \frac{K_\Phi}{K_d} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^3. \quad (2)$$

Величина дисперсного размера тела может быть определена по формуле

$$\delta = \frac{h}{K_\Phi} = \frac{d}{K_d}, \text{ м}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) имеем

$$h = \frac{W}{\omega} = \frac{K_\Phi}{K_d} \cdot d, \text{ м}. \quad (4)$$

В отличие от сферического тела пузырек воздуха не имеет твердой поверхности, на него действует сила поверхностного натяжения F_σ , Н, и он может изменять свою форму в процессе всплывания.

В работе Кутателадзе С.С. «Анализ подобия в теплофизике» (1982) представлен график зависимости величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ от значения критерия Рейнольдса Re в процессе обтекания жидкостью всплывающего сферического тела (А), а в работе [2] – в процессе обтекания пузырька воздуха (В) (рис. 1).

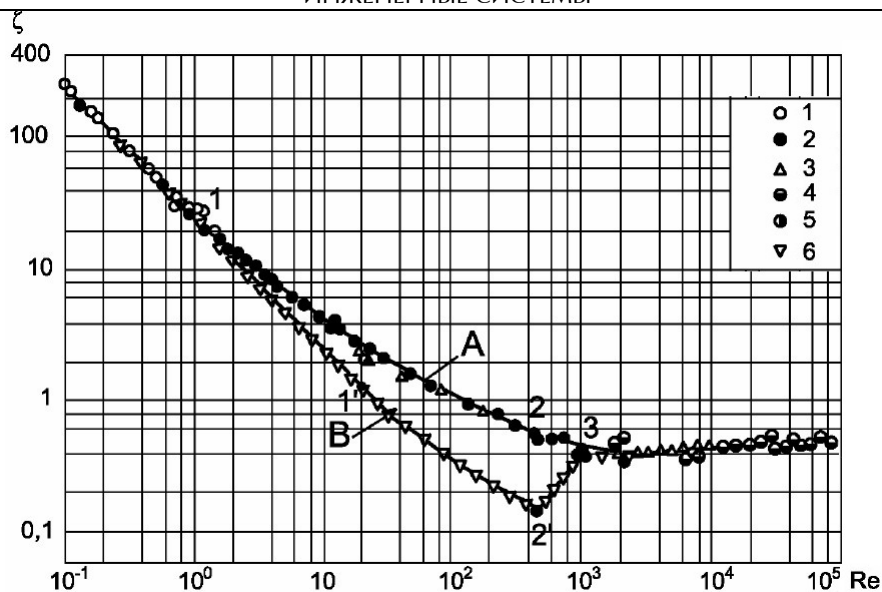


Рис. 1. График зависимости величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ в процессе всплывания в чистой воде:

A – сферического тела; B – пузырька воздуха – от значения критерия Рейнольдса Re

По измерениям: 1 – Шиллера – Шмиделя; 2 – Либстера; 3 – Аллена;

4, 5 – Визельсбергера; 6 – Кутателадзе

В работе Кутателадзе С.С., Стириковича М.А. «Гидродинамика газожидкостных систем» (1976) представлен график зависимости скорости свободного всплывания пузырька воздуха в чистой воде V , м/с, от величины его диаметра d , м (рис. 2).

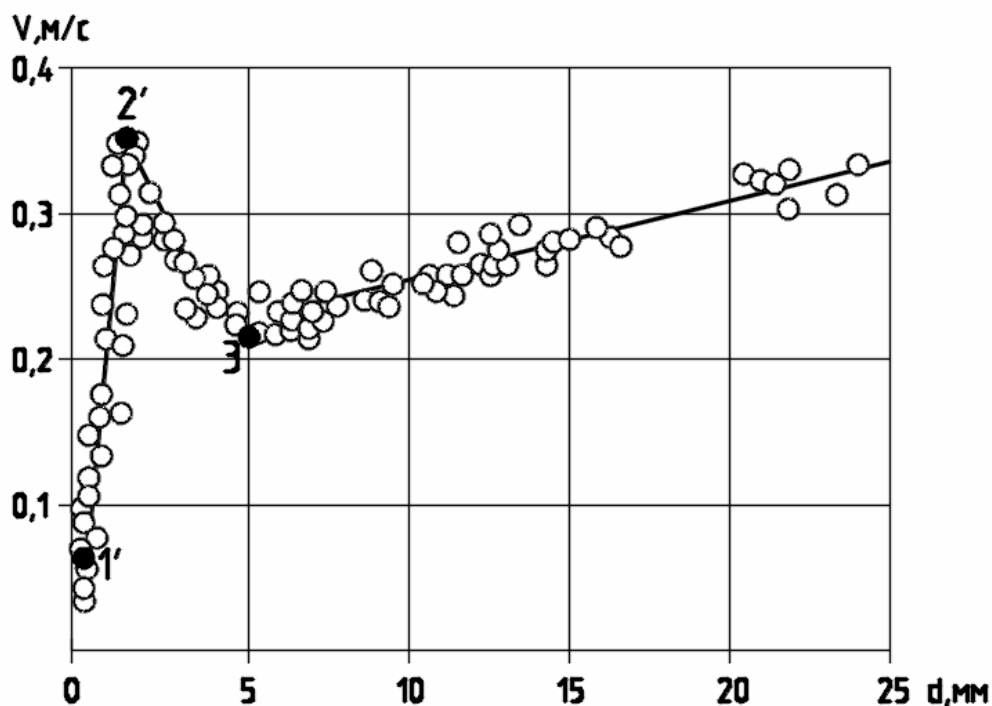


Рис. 2. График зависимости скорости свободного всплывания пузырька воздуха V , м/с, в чистой воде от величины его диаметра d , м

На графиках, изображенных на рис. 1 и 2, нами были расставлены точки 1, 2, 3, выделяющие основные режимы всплывания сферического тела, и точки 1', 2', 3, выделяющие основные режимы всплывания пузырька воздуха.

На пузырек воздуха, находящийся в объеме воды, действует выталкивающая сила (сила Архимеда), величина которой существенно превышает значение действующей на него силы тяжести. Суммарная величина действующей на пузырек выталкивающей силы определяется по формуле

$$F_g = W \cdot (\rho - \rho_B) \cdot g = W \cdot \Delta\rho \cdot g = \omega \cdot h \cdot \Delta\rho \cdot g, \text{ Н}, \quad (5)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность чистой воды при температуре 20°C ; $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при температуре 20°C ; $\Delta\rho = \rho - \rho_B = 997,0 \text{ кг/м}^3$ – разность плотностей воды и воздуха.

В стационарном режиме всплывания пузырька воздуха (при $V = \text{const}$) действующая на него выталкивающая сила F_g , Н, уравнивается силой гидродинамического давления набегающего на пузырек потока воды F_V , Н, ($F_g = F_V$), возникновение которой обуславливается вязкостью окружающей среды:

$$F_V = \omega \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2} = \omega \cdot \Delta P_V, \text{ Н}, \quad (6)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления; ΔP_V – разность давлений на лобовой и кормовой поверхностях всплывающего со скоростью V , м/с, пузырька воздуха.

Внутри пузырька воздуха под действием силы поверхностного натяжения F_σ , Н, возникает избыточное давление воздуха ΔP_σ , величина которого может быть определена по формуле

$$\Delta P_\sigma = \frac{2\sigma}{R}, \text{ Па}, \quad (7)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха, Н/м; R – радиус кривизны поверхности пузырька воздуха, м.

Величина силы поверхностного натяжения пузырька воздуха имеет значение

$$F_\sigma = \omega \cdot \Delta P_\sigma = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{2\sigma}{R} = \pi \cdot d \cdot \sigma \cdot \frac{d}{2R} = \chi \cdot \sigma \cdot \frac{d}{2R}, \text{ Н}, \quad (8)$$

где χ – смоченный периметр поперечного сечения пузырька воздуха, м.

Точка 2' на рис. 1 и 2 является граничной точкой, разделяющей ламинарный режим всплывания пузырька воздуха со скользящим пристеночным слоем и турбулентный режим всплывания. В этой точке пузырек воздуха сохраняет строго сферическую форму ($K_\Phi = 4$; $K_d = 6$; $R = 1/2d$).

В соответствии с данными, представленными в работе Кутателадзе С.С., Стыриковича М.А. «Гидродинамика газожидкостных систем» (1976), в точке 2' критерий Рейнольдса имеет величину $Re = 500$. Левее точки 2' наблюдаются режимы всплывания пузырька воздуха в чистой воде, при которых величина силы поверхностного натяжения F_σ превышает значение выталкивающей силы Архимеда F_g и силы гидродинамического давления F_V :

$$F_\sigma > F_g = F_V, \text{ Н}. \quad (9)$$

Правее точки 2' наблюдаются режимы всплывания пузырька воздуха в чистой воде, при которых сохраняется равенство сил:

$$F_\sigma = F_g = F_V, \text{ Н}. \quad (10)$$

Поскольку в точке 2' пузырек воздуха имеет строго сферическую форму ($K_\phi = 4; K_d = 6; R = 1/2d$), выполняется условие (10), величина критерия Рейнольдса имеет значение $Re = 500$ и в соответствии с данными, представленными на рис. 2, величина средней скорости всплывания пузырька имеет значение $V = 0,35$ м/с, то выполняется равенство

$$\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot \frac{d}{2R} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot \Delta \rho \cdot g = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2}, \quad \text{Н}, \quad (11)$$

$$d = \frac{v \cdot Re}{V} = \frac{1,01 \cdot 10^{-6} \cdot 500}{0,35} = 0,0014 \text{ м}, \quad (12)$$

$$h = \frac{K_d}{K_\phi} \cdot d = \frac{6}{4} \cdot 0,0014 = 0,00093 \text{ м}, \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot d = \frac{1}{2} \cdot 0,0014 = 0,0007 \text{ м}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{h}{\pi \cdot d^2} \cdot 2 \cdot R \cdot \Delta \rho \cdot g = \frac{h \cdot R}{2} \cdot \Delta \rho \cdot g = \\ &= \frac{0,00093 \cdot 0,0007}{2} \cdot 997 \cdot 9,8 = 0,0032 \text{ Н/м}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\zeta = \frac{2 \cdot g \cdot h}{V^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,00093}{0,35^2} \cdot \frac{997}{998,2} = 0,15, \quad (16)$$

$$\Delta P_\sigma = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2 \cdot 0,0032}{0,0007} = 9 \text{ Па}, \quad (17)$$

$$\Delta P_V = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2} = 998,2 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,35^2}{2} = 9 \text{ Па}, \quad (18)$$

$$\Delta P_g = \frac{W}{\omega} \cdot \Delta \rho \cdot g = h \cdot \Delta \rho \cdot g = 0,00093 \cdot 997 \cdot 9,8 = 9 \text{ Па}. \quad (19)$$

В точке 3 турбулентный режим всплывания пузырька воздуха в чистой воде переходит в область развитой турбулентности (в зону автомодельности режима всплывания, в область квадратичного закона сопротивления, в зону действия закона Ньютона), в которой коэффициент гидравлического сопротивления имеет постоянное значение $\zeta = 0,4 = \text{const}$ (см. рис. 1).

При всплывании пузырька воздуха в турбулентном режиме происходит его деформация, в результате чего сферический пузырек приобретает форму сплюсненного сфероида с большей осью, нормальной к направлению его движения, а величина коэффициента гидравлического сопротивления увеличивается со значения $\zeta = 0,15$ в точке 2' до $\zeta = 0,40$ в точке 3.

В точке 3 в соответствии с графиком, изображенным на рис. 2, пузырек воздуха имеет диаметр $d = 0,005$ м и скорость всплывания $V = 0,21$ м/с. Из условия (8) следует, что сплюсненный пузырек воздуха в точке 3 имеет объем

$$\begin{aligned} W &= \omega \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho}{\Delta \rho} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho}{\Delta \rho} = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,005^2}{4} \cdot 0,4 \cdot \frac{0,21^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{998,2}{997} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (20)$$

В первом приближении можно представить пузырек воздуха в точке 3 в виде идеального сфероида, состоящего из двух сегментов сферы радиусом R , м, имеющих высоту H , м, и площадь основания $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, м² (рис. 3).

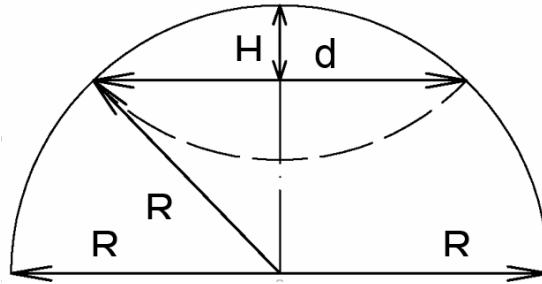


Рис. 3. Схема к определению геометрических характеристик сплюсненного сфероида диаметром d , м, с радиусом кривизны его поверхности R , м

Размер высоты сегмента сфероида H , м, может быть определен в соответствии с равенством, полученным из уравнения Пифагора:

$$R - H = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \text{ м.} \quad (21)$$

При величине радиуса кривизны поверхности сфероида $R = 0,039$ м, диаметром $d = 0,005$ м он будет иметь объем W_C , равный объему сплюсненного пузырька $W_C = 1,8 \cdot 10^{-8}$ м³.

$$H = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 0,0039 - \sqrt{0,0039^2 - \left(\frac{0,005}{2}\right)^2} = 0,000907 \text{ м,} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} W_C &= 2 \cdot \pi \cdot H^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \cdot H\right) = \\ &= 2 \cdot 3,14 \cdot 0,000907^2 \cdot \left(0,0039 - \frac{1}{3} \cdot 0,000907\right) = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (23)$$

Величина площади поверхности сфероида диаметром $d = 0,005$ м с радиусом кривизны его поверхности $R = 0,039$ м имеет значение:

$$f_C = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot H = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,0039 \cdot 0,000907 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (24)$$

Коэффициент формы сфероида равен:

$$K_\Phi = \frac{f_C}{\omega} = 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,005^2} = \frac{4,5 \cdot 10^{-5}}{1,96 \cdot 10^{-5}} = 2,3. \quad (25)$$

Коэффициент дисперсности сфероида

$$K_D = K_\Phi \cdot \frac{d}{h} = 2,3 \cdot \frac{0,005}{0,00093} = 12,4. \quad (26)$$

Для пузырька воздуха диаметром $d = 0,005$ м с радиусом кривизны поверхности $R = 0,039$ м, объемом $W_C = 1,8 \cdot 10^{-8}$ м³, всплывающего в чистой воде со скоростью $V = 0,21$ м/с, будут выполняться следующие равенства:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,21 \cdot 0,005}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 1040, \quad (27)$$

$$h = \frac{W}{\omega} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 1,8 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot 0,005^2} \approx 0,00093 \text{ м}, \quad (28)$$

$$\sigma = \frac{h \cdot R}{2} \cdot \Delta \rho \cdot g = \frac{0,00093 \cdot 0,0039}{2} \cdot 997 \cdot 9,8 = 0,018 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (29)$$

$$\Delta P_\sigma = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2 \cdot 0,018}{0,0039} = 9 \text{ Па}, \quad (30)$$

$$\Delta P_V = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2} = 998,2 \cdot 0,40 \cdot \frac{0,21^2}{2} = 9 \text{ Па}, \quad (31)$$

$$\Delta P_g = h \cdot \Delta \rho \cdot g = 0,00093 \cdot 997 \cdot 9,8 = 9 \text{ Па}. \quad (32)$$

Аналитические исследования позволили установить, что в условиях динамического равновесия сил (10), действующих на всплывающий в чистой воде пузырек воздуха, турбулентный режим его всплывания характеризуется следующими показателями:

– на нижней границе турбулентного режима всплывания пузырька воздуха при $Re = 500$:

$$d = 0,0014 \text{ м}; R = 0,0007 \text{ м}; h = 0,00093 \text{ м}; K_\Phi = 4; K_d = 6; \frac{d}{R} = 2; \frac{d}{h} = 1,5;$$

$$V = 0,35 \text{ м/с}; \zeta = 0,15; \Delta P = 9 \text{ Па}; \sigma = 0,0032 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; W = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3;$$

$$f = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \omega = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

– на верхней границе турбулентного режима всплывания пузырька воздуха при $Re = 1040$:

$$d = 0,005 \text{ м}; R = 0,0039 \text{ м}; h = 0,00093 \text{ м}; K_\Phi = 2,3; K_d = 12,4; \frac{d}{R} = 1,3;$$

$$\frac{d}{h} = 5,4; V = 0,21 \text{ м/с}; \zeta = 0,40; \Delta P = 9 \text{ Па}; \sigma = 0,018 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; W = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3;$$

$$f = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \omega = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

У пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в турбулентном режиме, сохраняется постоянное значение величины избыточного давления воздуха $\Delta P = 9 \text{ Па} = \text{const}$ и характерного размера $h = 0,00093 \text{ м} = \text{const}$. Основной энергетической характеристикой пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде со скоростью V , м/с, является энергия избыточного давления воздуха внутри пузырька ΔP , Па:

$$\Delta E = \Delta P \cdot W = \Delta P \cdot h \cdot \omega = \Delta P \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 \cdot \Delta P \cdot h \cdot d^2, \text{ Дж}. \quad (33)$$

Пузырек, всплывающий в воде, имеет величину удельной объемной энергии избыточного давления воздуха

$$\Delta E_w = \frac{\Delta E}{W} = \frac{\Delta P \cdot W}{W} = \Delta P, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} (\text{Па}). \quad (34)$$

Пузырек, всплывающий в воде, имеет величину удельной энергии избыточного давления в объеме куба воздуха со стороной $d, \text{м}$:

$$\Delta E_{d^3} = \frac{\Delta E}{d^3} = \Delta P \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{d^3} = 0,785 \cdot \Delta P \cdot \frac{h}{d}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (35)$$

Объем воздуха внутри пузырька может быть определен по формуле

$$W = h \cdot \omega = h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 \cdot h \cdot d^2, \text{м}^3; \quad (36)$$

откуда для сплюсненного пузырька воздуха, всплывающего в воде в турбулентном режиме при условии $\Delta P = 9 \text{ Па} = \text{const}$ и $h = 0,00093 \text{ м} = \text{const}$, выполняются следующие равенства:

$$W = 0,785 \cdot 0,00093 \cdot d^2 = 7,3 \cdot 10^{-4} \cdot d^2, \text{м}^3, \quad (37)$$

и

$$\Delta E_{d^3} = \frac{\Delta P \cdot W}{d^3} = \frac{9 \cdot 7,3 \cdot 10^{-4} \cdot d^2}{d^3} = \frac{6,57 \cdot 10^{-3}}{d}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (38)$$

Для пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в турбулентном режиме при значениях критерия Рейнольдса $500 \leq \text{Re} \leq 1040$, выполняются следующие закономерности:

$$V = 0,025 \cdot d^{-0,40}, \text{м/с}, \quad (39)$$

$$\zeta = \frac{W}{\omega} \cdot \frac{2 \cdot g}{V^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = h \cdot \frac{2 \cdot g}{V^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0,00093 \cdot \frac{2 \cdot 9,8}{(0,025 \cdot d^{-0,40})^2} \cdot \frac{997}{998,2} = 29 \cdot d^{0,80}, \quad (40)$$

$$R = 5 \cdot d^{1,35}, \text{м}, \quad (41)$$

$$\Delta P = \Delta P_v = \Delta P_g = \Delta P_\sigma = 9 \text{ Па} = \text{const}, \quad (42)$$

$$h = 0,00093 \text{ м} = \text{const}, \quad (43)$$

$$\frac{K_\Phi}{K_\Delta} = \frac{h}{d} = \frac{0,00093}{d}, \quad (44)$$

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot R}{2} = \frac{9 \cdot 5 \cdot d^{1,35}}{2} = 22,5 \cdot d^{1,35}, \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (45)$$

$$W = 0,785 \cdot h \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,00093 \cdot d^2 = 0,00073 \cdot d^2, \text{м}^3, \quad (46)$$

$$\Delta E_{d^3} = 0,785 \cdot \Delta P \cdot \frac{h}{d} = 0,785 \cdot 9 \cdot \frac{0,00093}{d} = \frac{0,06}{d}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (47)$$

В соответствии с данными, представленными на графике, изображенном на рис. 2 в режиме всплывания пузырька воздуха в области развитой турбулентности (правее точки 3), выполняется следующее равенство:

$$V = 0,80 \cdot d^{0,25}, \text{ м/с.} \quad (48)$$

С учетом уравнения (11) и формулы (48) для пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в режиме развитой турбулентности (квадратичного закона сопротивления при $\zeta = 0,40 = \text{const}$), можно получить следующие закономерности:

$$h = \zeta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho}{\Delta \rho} = 0,4 \cdot \frac{(0,80 \cdot d^{0,25})^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{998,2}{997} = 0,0131 \cdot d^{0,50}, \text{ м,} \quad (49)$$

$$\Delta P = \Delta P_V = \Delta P_g = \Delta P_\sigma = h \cdot \Delta \rho \cdot g = 0,0131 \cdot d^{0,50} \cdot 997 \cdot 9,8 = 128 \cdot d^{0,50}, \text{ Па,} \quad (50)$$

$$\frac{K_\Phi}{K_D} = \frac{h}{d} = \frac{0,0131 \cdot d^{0,50}}{d} = \frac{0,0131}{d^{0,50}}, \quad (51)$$

$$W = 0,785 \cdot h \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,0131 \cdot d^{0,50} \cdot d^2 = 0,0103 \cdot d^{2,5}, \text{ м}^3, \quad (52)$$

$$\Delta E_{d^3} = \frac{\Delta P \cdot W}{d^3} = \frac{128 \cdot d^{0,50} \cdot 0,0103 \cdot d^{2,5}}{d^3} = 1,3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \text{const.} \quad (53)$$

Левее точки 2' на графиках, изображенных на рис. 1 и 2 в режимах всплывания пузырьков воздуха в чистой воде, при которых величина силы поверхностного натяжения F_σ превышает значение выталкивающей силы Архимеда F_g и значение силы гидродинамического давления набегающего на пузырек потока воды F_V (выполняется условие (9)), пузырек воздуха сохраняет строго сферическую форму ($K_\Phi = 4$; $K_D = 6$; $R = \frac{1}{2d}$; $\frac{K_\Phi}{K_D} = 0,67$), сохраняется постоянное значение избыточного давления воздуха внутри пузырька $\Delta P_\sigma = 9 \text{ Па} = \text{const}$ ($\Delta P_\sigma > \Delta P_g = \Delta P_V$) и выполняются следующие закономерности:

$$h = \frac{K_\Phi}{K_D} \cdot d = \frac{4}{6} \cdot d = 0,67 \cdot d, \text{ м,} \quad (54)$$

$$\Delta P = \Delta P_\sigma = 9 \text{ Па} = \text{const}, \quad (55)$$

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot R}{2} = \frac{\Delta P}{2} \cdot \frac{d}{2} = \frac{9}{2} \cdot \frac{d}{2} = 2,25 \cdot d, \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (56)$$

$$W = 0,785 \cdot h \cdot d^2 = 0,785 \cdot \frac{K_\Phi}{K_D} \cdot d \cdot d^2 = 0,785 \cdot \frac{4}{6} \cdot d^3 = 0,523 \cdot d^3, \text{ м}^3, \quad (57)$$

$$\Delta E_{d^3} = \frac{\Delta P \cdot W}{d^3} = \frac{9 \cdot 0,523 \cdot d^3}{d^3} = 4,7 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \text{const.} \quad (58)$$

Во всех режимах всплывания пузырька воздуха в чистой воде потенциальная энергия избыточного давления воздуха внутри пузырька E_w , Дж, равна потенциальной энергии силы поверхностного натяжения E_σ , Дж:

$$E_w = E_\sigma, \text{ Дж}, \quad (59)$$

$$E_w = \Delta P_\sigma \cdot W = \frac{2 \cdot \sigma}{R} \cdot W = \sigma \cdot \frac{2 \cdot W}{R} = \sigma \cdot f_w = E_\sigma, \text{ Дж}, \quad (60)$$

где $f_w = \frac{2 \cdot W}{R} = \omega \cdot \frac{2 \cdot h}{R} = f \cdot \frac{2 \cdot \delta}{R}$, м², – приведенное значение площади поверхности пузырька воздуха.

Использование термодинамического подхода при проведении теоретических исследований процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха в различных режимах позволило сделать следующие выводы:

1. Процесс всплывания пузырьков воздуха в чистой воде может происходить при следующих условиях:

– всплывание при значениях критерия $Re < 500$, в процессе которого величина силы поверхностного натяжения пузырька воздуха F_σ , Н, превышает значение выталкивающей силы Архимеда F_g , Н, и значение действующей на него силы гидродинамического давления набегающего потока воды F_v , Н ($F_\sigma > F_g = F_v$);

– всплывание при величинах критерия Рейнольдса $Re < 500$ в условиях динамического равенства действующих на всплывающий пузырек сил ($F_\sigma = F_g = F_v$).

2. В режимах всплывания пузырьков сферической формы при значениях критерия Рейнольдса $Re < 500$ величины удельной объемной энергии избыточного давления воздуха внутри пузырька ΔE_w , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, и удельной энергии избыточного давления

воздуха в объеме куба со стороной, равной размеру его диаметра ΔE_{d^3} , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, имеют

постоянные значения $\Delta E_w = 9 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, $\Delta E_{d^3} = 4,7 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

3. В турбулентном режиме всплывания пузырьков при значениях критерия Рейнольдса $500 \leq Re \leq 1040$ величина удельной объемной энергии избыточного да-

вления воздуха внутри пузырька имеет постоянное значение $\Delta E_w = 9 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, а удельная

энергия избыточного давления воздуха в объеме куба со стороной, равной размеру его диаметра, при увеличении диаметра d уменьшается в процессе деформации поверх-

ности пузырька по зависимости $\Delta E_{d^3} = 0,006 \cdot d^{-1} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ со значения $\Delta E_{d^3} = 4,7 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$

при $d = 0,0014$ м до величины $\Delta E_{d^3} = 1,3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ при $d = 0,005$ м.

4. При всплывании пузырьков воздуха в режиме развитой турбулентности при значениях критерия Рейнольдса $Re > 1040$ величина удельной объемной энергии избыточного давления воздуха внутри пузырька при увеличении его диаметра

возрастает по зависимости $\Delta E_w = \Delta P = 128 \cdot d^{0,50} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, а удельная энергия избыточного давления воздуха в объеме куба со стороной, равной размеру его диаметра d , м,

сохраняет свое постоянное значение $\Delta E_{d^3} = 1,3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

1. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкостенных сферических тел / С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4. – С.159–168.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.

References

1. Andreev, S.Yu. Theoretical foundations of the processes of floating air bubbles and thin-walled spherical bodies in clean water / S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – No.4. – P.159–168.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinsky // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.

УДК 628.14.659

DOI 10.54734/20722958_2024_2_175

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, 26

Продоус Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор,
независимый эксперт по водоснабжению
и канализации
E-mail: pro@enco.su

Шлычков Дмитрий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
E-mail: ShlyichkovDI@mgsu.ru

Шестаков Александр Анатольевич,
аспирант кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
E-mail: 89103280171S321555@yandex.ru

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoye shosse

Prodous Oleg Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Independent
expert on Water Supply and Sewerage
E-mail: pro@enco.su

Shlychkov Dmitry Ivanovich,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Water Supply
and Sanitation»
E-mail: ShlyichkovDI@mgsu.ru

Shestakov Aleksander Anatolyevich,
Postgraduate student of the Department
«Water Supply and Sanitation»
E-mail: 89103280171S321555@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗНЫХ МЕТОДИК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИЗНОШЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С ВНУТРЕННИМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

О.А. Продоус, Д.И. Шлычков, А.А. Шестаков

Предлагается новая методика гидравлического расчета металлических водопроводных труб с внутренними отложениями на основе оценки влияния толщины слоя отложений на характеристики гидравлического потенциала труб. Определены зависимости фактического гидравлического уклона от скорости движения жидкости (коэффициент эффективности эксплуатации трубопровода зависит от фактической толщины слоя внутренних отложений).

Ключевые слова: металлические водопроводные трубы, гидравлический потенциал, методики расчета труб, сравнение характеристик

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS OF HYDRAULIC CALCULATION OF WORN-OUT METAL WATER SUPPLY NETWORKS WITH INTERNAL DEPOSITS

О.А. Prodous, D.I. Shlychkov, A.A. Shestakov

A new method of hydraulic calculation of metal water pipes with internal deposits is proposed based on an assessment of the effect of the sediment layer thickness on the characteristics of the hydraulic potential of the pipes. The dependences of the actual hydraulic slope on the speed of fluid movement are determined (the efficiency coefficient of pipeline operation depends on the actual thickness of the layer of internal deposits).

Keywords: metal water pipes, hydraulic potential, pipe calculation methods, comparison of characteristics

Введение

Известны две методики гидравлического расчета металлических водопроводных труб: **классическая**, по таблицам для новых труб, без учета толщины слоя внутренних отложений; **уточненная**, по коэффициенту эффективности эксплуатации сети [2, 4].

Первая методика отличается от второй количеством расчетных характеристик труб (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

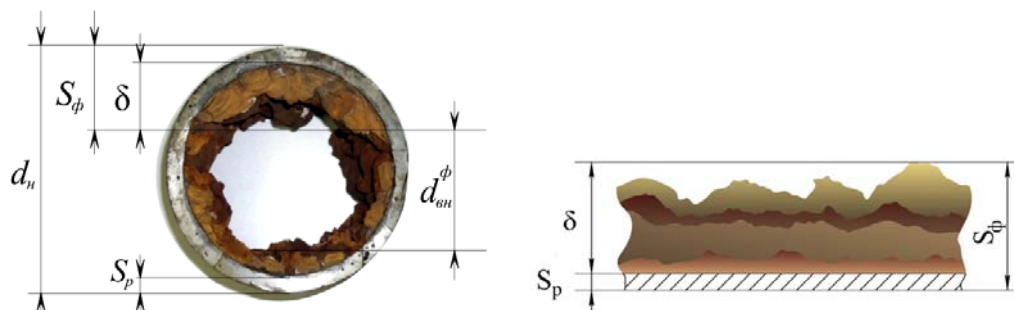
Заданные и расчетные гидравлические характеристики
сравниваемых металлических труб

Расчетные характеристики труб									
Классическая методика: СП 31.1330.2012				Методика авторов					
Параметры				Параметры					
q^* л/с (м ³ /с)	$d_{вн}$, м	V , м/с	$1000 i$, м/м	q^* л/с (м ³ /с)	δ , мм (м)	$d_{пр}$, м	$V_{пр}$, м/с	$1000 i_{пр}$ м/м	$K_{эф}$

П р и м е ч а н и е : q^* – заданный расход в л/(м³/с); $d_{вн}$ – внутренний диаметр труб по ГОСТ, м; V – скорость напорного перемещения жидкости, м/с; $1000i$ – удельные потери напора i на преодоление сопротивлений по длине, мм/м (м/м); δ – толщина слоя внутренних отложений, мм (м) (рис. 1); $d_{пр}$ – приведенный внутренний диаметр труб с толщиной слоя отложений δ , м; $V_{пр}$ – приведенная скорость в трубе с толщиной слоя отложений δ , м/с; $1000i_{пр}$ – приведенный гидравлический уклон труб с отложениями на их внутренней поверхности, мм/м (м/м); $K_{эф}$ – коэффициент эффективности эксплуатации сети с отложениями σ на внутренних стенках труб.

Для гидравлического расчета значений гидравлических характеристик труб по стандартной методике [1, 2] и по методике, разработанной авторами [3, 4], требуется определять разное количество гидравлических параметров труб. Отличительной особенностью второй методики гидравлического расчета металлических труб с внутренними отложениями (методика авторов) является расчет следующих фактических значений параметров труб по формулам (см. рис. 1): δ , $d_{пр}$, $V_{пр}$, $1000i$, $K_{эф}$.

а



б

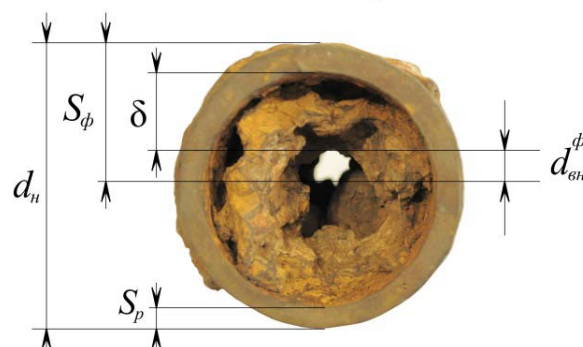


Рис. 1. Внутренние отложения на стенках стальных труб (а)
и чугунных труб из серого чугуна (б)

Обозначения на рис. 1:

S_p – расчетная толщина стенки трубы по ГОСТ для стальных и чугунных труб, м (мм);

$S_φ$ – фактическая толщина стенки трубы со слоем отложений σ , м (мм);

δ – фактическая толщина слоя отложений, мм,

$$\delta = S_\phi - S_p, \text{ мм (м)}; \quad (1)$$

d_n – наружный диаметр трубы по ГОСТ, мм (м);

$d_{\text{вн}}^\phi$ – фактический внутренний диаметр труб с отложениями σ , мм (м),

$$d_{\text{вн}}^\phi = (d_n - 2S_p) - 2\delta, \text{ мм (м)}. \quad (2)$$

Расчет фактических значений характеристик гидравлического потенциала труб ($d_{\text{вн}}^\phi$, V_ϕ , i_ϕ) производится по формулам [4]; $d_{\text{вн}}^\phi$ – по формуле (2); d_ϕ – по формуле

$$d_\phi = d_{\text{вн}}^\phi - d_{\text{пр}}, \text{ мм (м)}, \quad (3)$$

где $d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр труб, определяемый по следующей формуле [6]:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - (d_{\text{вн}} - \delta)^2}, \text{ мм (м)}. \quad (4)$$

Фактическую (среднюю) скорость перемещения воды в трубе со слоем отложений δ , м/с, вычисляем по формуле

$$V_\phi = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^\phi)^2}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где q – заданный расход, л/с ($\text{м}^3/\text{с}$).

Методы

Расчет значений фактического гидравлического уклона труб i_ϕ со слоем отложений δ производится по формуле профессора Ф.А. Шевелева, имеющей вид [2, 3]:

$$i_\phi = 0,00107 \frac{V_\phi^2}{(d_{\text{вн}}^\phi)^{1,3}}, \text{ мм/м (м/м)}. \quad (6)$$

Уточненный авторами вид формулы (4) с учетом толщины слоя внутренних отложений δ [4]:

$$i_\phi = 0,00107 \frac{V_\phi^2}{[(d_n - 2S_p) - 2\delta]^{1,3}}, \text{ мм/м (м/м)}. \quad (7)$$

Условия задачи

Сравнить значения характеристик гидравлического потенциала новых стальных электросварных труб с наружным диаметром 325 мм ($S_p=8,0$ мм), транспортирующих расход питьевой воды $q=91$ л/с с характеристиками труб того же диаметра с толщиной слоя внутренних отложений $\delta=25,0$ мм (0,025 м).

Построить для сравнения и анализа графики зависимостей: $i_p=f(V_p)$, $i_\phi=f(V_\phi)$ и $K_{\text{эф}}=f(\sigma_\phi)$.

Решение

1. Определяют фактическое значение $d_{\text{пр}}^\phi$ по формуле

$$d_{\text{пр}}^\phi = d_{\text{вн}} - d_{\text{пр}}, \text{ м}.$$

2. По формуле (4) находят приведенное значение $d_{пр}$:

$$d_{пр} = \sqrt{0,311^2 (0,311 - 0,025)^2} = \sqrt{0,00142} = 0,119 \text{ м.}$$

Тогда $d_{пр}^\phi = 0,311 - 0,119 = 0,192 \text{ м.}$

3. По формуле (5), с учетом формулы (4), определяют значение V_ϕ :

$$V_\phi = \frac{4 \cdot 0,091}{3,14 \cdot 0,192^2} = \frac{0,364}{0,11575} = 3,14 \text{ м/с.}$$

4. По формуле (7) вычисляют значение фактического гидравлического уклона сети, имеющей слой внутренних отложений $\delta_\phi = 25 \text{ мм}$:

$$i_\phi = 0,00107 \frac{3,14^2}{0,192^{1,3}} = \frac{0,01055}{0,11703} = 0,09015 \text{ м/м.}$$

$$1000 i_\phi = 90,15 \text{ м/м.}$$

5. По данным табл. 2, для условий приведенного примера, на рис. 2 и 3 построены графики зависимостей:

$$i_{p(\phi)} = f(V_{p(\phi)}) \text{ и } K_{\phi} = f(\delta_\phi).$$

Т а б л и ц а 2

Изменение значений характеристик гидравлического потенциала труб
в зависимости от скорости движения воды при изменении δ_ϕ

Толщина слоя отложений δ_ϕ	Характеристики гидравлического потенциала труб при разных значениях δ_ϕ			
	$d_{пр}^\phi$, мм	V_ϕ , м/с	i_ϕ , мм/м	K_{ϕ}
0	311	1,2	0,01171	1
5	256	1,77	0,01969	0,60 *
15	0,216	2,49	0,04864	0,24
20	0,201	2,86	0,07056	0,17
25	0,192	3,14	0,09015	0,13
30	0,281	3,66	0,13514	0,09

* При значениях $K_{\phi} \leq 0,60$ сеть эксплуатировать **недопустимо** (табл. 3).

6. Рассчитывают значение K_{ϕ} для новых стальных труб и сравнивают его с количественным значением K_{ϕ} (табл. 3) для труб с толщиной слоя отложений $\delta_\phi = 25 \text{ мм}$:

$$K_{\phi} = \frac{(d_{вн}^p)^2 \cdot V_p \cdot i_p}{(d_\phi)^2 \cdot V_\phi \cdot i_\phi} = \frac{0,311^2 \cdot 1,20 \cdot 0,01171}{0,192^2 \cdot 3,14 \cdot 0,09015} = \frac{0,001359}{0,010435} = 0,13.$$

Т а б л и ц а 3

Диапазон изменения K_{ϕ} для сетей водоснабжения

Значение величины K_{ϕ}	Продолжительность периода остаточной эксплуатации трубопровода из стали и серого чугуна $T_{исп}$, лет
$0,95 \leq K_{\phi} \leq 1$	$T_{исп} \geq 10$ лет с ежегодным контролем значений фактических потерь напора i_ϕ и толщины фактического слоя отложений δ_ϕ
$0,90 \leq K_{\phi} \leq 0,95$	$T_{исп} \geq$ не менее 5 лет с ежегодным контролем значений i_ϕ и δ_ϕ
$0,80 \leq K_{\phi} \leq 0,90$	Трубопровод эксплуатировать нецелесообразно
$K_{\phi} < 0,80$	Трубопровод эксплуатировать недопустимо

Так как для приведенного примера значение $K_{эф} \leq 0,80$, то водопроводную сеть с толщиной слоя внутренних отложений $\delta=25$ мм эксплуатировать в дальнейшем **недопустимо** из-за больших значений фактических потерь напора i_{ϕ} на преодоление сопротивлений по длине. Сеть с такими значениями характеристик следует выводить из эксплуатации.

Заключение

В табл. 4 для рассмотренного примера приведены значения характеристик гидравлического потенциала сравниваемых труб и показаны проценты расхождения значений характеристик, подтверждающие, что трубопровод с толщиной слоя отложений $\delta=25$ мм эксплуатировать **недопустимо**.

Т а б л и ц а 4

Характеристики гидравлического потенциала сравниваемых труб

Значения расчетных характеристик сравниваемых труб							
Новых				С толщиной слоя отложений $\delta=25$ мм			
$d_{вн}^p$, м	V_p , м/с	i_p , мм/м	$K_{эф}$	$d_{вн}^{\phi}$, м	V_{ϕ} , м/с	i_{ϕ} , мм/м	$K_{эф}^{\phi}$
0,311	1,20	0,00703	1,0	0,192	3,14	0,09015	0,13
Процент расхождения значений характеристик труб, %							
-----	-----	-----	-----	38,26	61,78	92,2	13,0

В табл. 5 представлены данные для сравнения табличных значений фактических характеристик труб для приведенного примера.

Т а б л и ц а 5

Табличные значения характеристик труб							
по таблицам Ф.А. Шевелева				по таблицам авторов			
$d_{вн}$, мм	δ_{ϕ} , мм	V_{ϕ} , м/с	i_{ϕ} , мм/м	$d_{пр}^*$, мм	δ_{ϕ} , мм	V_{ϕ} , м/с	i_{ϕ} , мм/м
300	1,0	1,20	7,04	0,192	25	1,73	17,8
Процент расхождения табличных значений характеристик труб, %							
-----	-----	-----	-----	36,0	99,75	30,64	60,45

$$* d_{пр}^{\phi} = d_{вн} - d_{пр}$$

Анализ графиков, представленных на рис. 2–3, и данных, приведенных в табл. 5, показывает, что процент расхождения величин значений гидравлических характеристик труб для приведенного примера по двум разным справочным пособиям [2, 3] составляет:

- для фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{\phi}$ – до 36,0 % в сравнении с данными из таблиц Ф.А. Шевелева;
- фактическая толщина слоя внутренних отложений δ_{ϕ} – до 99,75 %, так как Ф.А. Шевелев исследовал экспериментально только стальные трубы с $\delta_{\phi}=1,0$ мм;
- для фактической скорости потока V_{ϕ} – до 30,64 % по той же причине;
- по фактическому гидравлическому уклону i_{ϕ} – до 60,45 % из-за разной фактической толщины слоя внутренних отложений δ_{ϕ} .

Таким образом, проведенное сравнение значений характеристик гидравлического потенциала труб, рассчитанных с помощью двух разных справочных пособий, позволяет сделать следующие выводы:

- использовать справочное пособие Ф.А. Шевелева и А.Ф. Шевелева [2] (таблица II. 2 – Трубы стальные электросварные) **не рекомендуется** из-за большой величины погрешностей значений расчетных характеристик труб, вызванных изменением диапазона фактической толщины слоя внутренних отложений δ_{ϕ} ;
- для практических расчетов значений гидравлических характеристик стальных и чугунных труб с внутренними отложениями, с толщиной слоя до 30 мм включительно, рекомендуется использовать, как наиболее точное, справочное пособие Про-

доуса О.А., Шпилова А.А. и Якубчика П.П. [3], учитывающее изменение значений гидравлических характеристик труб при толщине слоя внутренних отложений δ_ϕ в диапазоне значений

$$0 \leq \delta_\phi \leq 30 \text{ мм};$$

- для обоснования необходимости подготовки проектов реконструкции, перекладки или бестраншейного ремонта сетей водоснабжения с внутренними отложениями на стенках труб требуется разработать методику оценки гидравлического состояния трубопроводов и придать ей нормативный статус.

Сделанные выводы подтверждаются графиками зависимостей $i_{p(\phi)} = f(V_{p(\phi)})$ и $K_{\text{эф}} = f(\delta_\phi)$, приведенными на рис. 2 и 3.

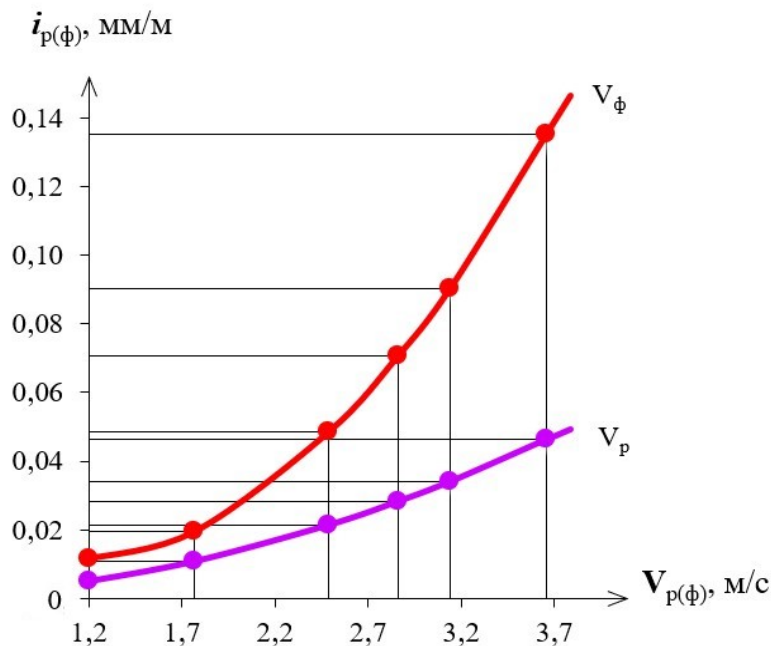


Рис. 2. График зависимости $i_{p(\phi)} = f(V_{p(\phi)})$

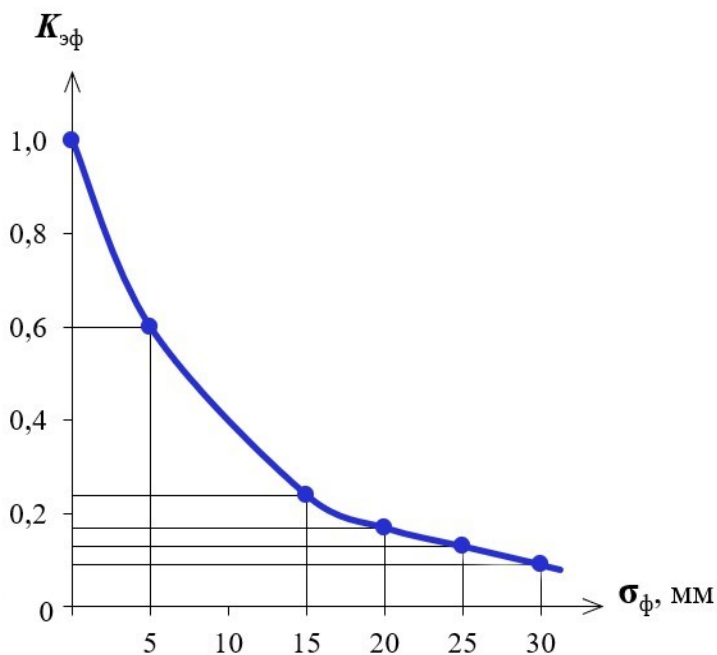


Рис. 3. График зависимости $K_{\text{эф}} = f(\delta_\phi)$

1. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84. Официальное издание. – М., 2012. – 124 с.
2. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – 12-е изд. – М.: ООО «Издательский Дом «Бастет», 2020. – 428 с.
3. Продоус, О.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями: справочное пособие / О.А. Продоус, А.А. Шипилов, П.П. Якубчик. – 1-е изд. – СПб.–М.: Изд-во ООО «Перо», 2021. – 238 с.
4. Продоус, О.А. Новый подход к гидравлическому расчету металлических трубопроводов водоснабжения с отложениями на их внутренних стенках / О.А. Продоус, П.П. Якубчик // Инженерные системы АВОК Северо-Запад. – 2022. – № 1. – С. 28–30.
5. Продоус, О.А. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования / О.А. Продоус, Л.Д. Терехов, П.П. Якубчик, А.С. Черных // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т.18, вып. 3. – С. 421–427. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-3-421-427
6. Продоус, О.А. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков, П.П. Якубчик, С.В. Пархоменко // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 6. – С. 738–746. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746
7. Продоус, О.А. Уточненный вид расчетной зависимости для гидравлического расчета изношенных металлических водопроводных труб с внутренними отложениями / О.А. Продоус // Яковлевские чтения: сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. НИУ МГСУ. – М., 2021. – С. 178–193.
8. Новиков, М.Г. Предотвращение вторичного загрязнения воды в централизованных системах водоснабжения при ее транспортировке потребителям / М.Г. Новиков, О.А. Продоус // Водные ресурсы и водопользование. – г. Нур-Султан, Казахстан, 2021. – № 12 (215). – С. 17–20.
9. Продоус, О.А. Предотвращение вторичного загрязнения питьевой воды в металлических сетях водоснабжения / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков, Д.В. Спицов // Строительство: наука и образование. – 2022. – Т 12, вып. 2. – С. 62–71. – URL: <http://nso-journal.ru>. – DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2 .
10. Продоус, О.А. Гидравлическое прогнозирование продолжительности использования металлических трубопроводов водоснабжения и водоотведения / О.А. Продоус // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2020. – № /11 (155). – С. 28–32.
11. Продоус, О.А. Рекомендации по реконструкции неновых металлических трубопроводов водоснабжения из стали и серого чугуна / О.А. Продоус, М.Г. Новиков, Г.А. Самбурский, А.А. Шипилов, Л.Д. Терехов, П.П. Якубчик, В.А. Чесноков. – СПб.–М.: Изд. ООО «Свое издательство», 2021. – 36 с.
12. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
13. Абрамов, Н.Н. Расчет водопроводных сетей / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
14. Абрамов, Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 287 с.
15. Абрамович, И.А. Некоторые вопросы корректировки норм проектирования / И.А. Абрамович, Г.Н. Семчук // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 12. – С. 15–16.
16. Белан, А.Е. Технология водоснабжения / А.Е. Белан. – Киев: Наукова думка, 1985. – 263 с.
17. Белан, А.Е. Проектирование и расчет устройств водоснабжения / А.Е. Белан, П.Д. Хоружий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Будівельник, 1981. – 190 с.

18. Гальперин, Е.М. Расчет кольцевой водопроводной сети с учетом действительных условий / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 5. – С. 26–27.
19. Дмитриев, А.В. Городские инженерные сети / А.В. Дмитриев, А.Б. Кетаев. – М.: Стройиздат, 1988. – 175 с.
20. Калицун, В.Н. Гидравлика, водоснабжение и канализация / В.Н. Калицун, Ю.М. Ласков. – М.: Стройиздат, 2000. – 417 с.
21. Николадзе, Г.И. Водоснабжение / Г.И. Николадзе, М.А. Сомов. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.
22. Чупин, В.Р. Моделирование и оптимизация трубопроводных систем коммунального хозяйства / В.Р. Чупин, Д.И. Майзень, Р.В. Чупин // Вестник ИргТУ. – 2008. – Т.1, №1. – С. 169–180.
23. Dond, H. Optimized sewer design cuts cost / H. Dond // Water and Sawege. – 1980. – Referense Number.
24. Donigian, A.S., Jr. and W.C. Huber. Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-Urban Areas, 1991. EPA/600/3-91/039, U.S. EPA, Athens, GA, 30605.
25. Hiszo, G. Seismic Response Analyses of Joint - Connected Buried Pipelines Including Bent Sections / G. Hiszo, S. Mocata, K. Hicoyki, J. Jutaki // Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. – 1982. – Vol. 44, №1. – P.182–221.
26. Kloss, H. Solving the problem of non-water supply and sewerage systems / H. Kloss, M. Roman // Gas, water and sanitary equipment. – 1974. – No.9. – 2008. – P. 34–51.
27. O'Rurke, M.I. Transverse Seismic Wave at Pipeline Junctions / M.I. O'Rurke, R.R. Picul, L.R.L. Wang // Techn Coun. ASCE Proc. – 1982. – Vol.108, №1. – P. 173–177.

References

1. SP 31.13330.2021. Water supply. Outdoor networks and structures. Updated version of SNiP 2.04.02-84. Official publication. – М., 2012. – 124 p.
2. Shevelev, F.A. Tables for hydraulic calculation of water pipes: reference manual / F.A. Shevelev, A.F. Shevelev. – 12th edition. – М.: LLC «Publishing House «Bastet»2020. – 428 p.
3. Prodous, O.A. Tables for hydraulic calculation of water pipes made of steel and gray cast iron with internal deposits: Reference Manual 1st edition / O.A. Prodous, A.A. Shipilov, P.P. Yakubchik. –St. Petersburg – М.: Publishing house LLC «Pero», 2021. – 238 p.
4. Prodous, O.A. A new approach to the hydraulic calculation of metal water supply pipelines with deposits on their inner walls / O.A. Prodous, P.P. Yakubchik // Engineering systems of AVOC North-West. – 2022. – No. 1. – P. 28–30.
5. Prodous, O.A. Technical regulation of the values of hydraulic parameters of non-sheet metal pipes to extend the period of their use / O.A. Prodous, L.D. Terekhov, P.P. Yakubchik, A.S. Chernykh // News of the St. Petersburg University of Railway Transport. – 2021. – Vol.18, Issue 3. – P. 421–427. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-3-421-427
6. Prodous, O.A. Influence of the thickness of the layer of internal deposits in the pipelines of water supply and sanitation systems on the duration of their residual operation / O.A. Prodous, D.I. Shlychkov, P.P. Yakubchik, S.B. Parkhomenko // Bulletin of MGSU. – 2022. – Vol. 17, Issue 6. – P. 738–746. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746
7. Prodous, O.A. A refined type of calculation dependence for the hydraulic calculation of worn metal water pipes with internal deposits / O.A. Prodous // Collection «Scientific electronic edition» of the NRU MGSU «Yakovlev readings», 2021. – P. 178–193.
8. Novikov, M.G. Prevention of secondary water pollution in centralized water supply systems during its transportation to consumers / M.G. Novikov, O.A. Prodous // Water resources and water use. – Nur-Sultan, Kazakhstan, 2021. – № 12 (215). – P. 17–20.
9. Prodous, O.A. Prevention of secondary contamination of drinking water in metal water supply networks / O.A. Prodous, D.I. Shlychkov, D.V. Spitsov // Construction: science

and education. – 2022. – Vol. 12, Issue. 2. – P. 62–71. – URL: <http://nso-journal.ru>. – DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2 .

10. Prodous, O.A. Hydraulic forecasting of the duration of use of metal pipelines of water supply and sanitation / O.A. Prodous // Water treatment. Water treatment. Water supply. – 2020. – No. /11 (155). – P. 28–32.

11. Prodous, O.A. Recommendations for the reconstruction of non-standard metal water supply pipelines made of steel and gray cast iron / O.A. Prodous, M.G. Novikov, G.A. Sambursky, A.A. Shipilov, L.D. Terekhov, P.P. Yakubchik, V.A. Chesnokov. – St. Petersburg–M.: Ed. LLC «Svoe publishing House», 2021. – 36 p.

12. Abramov, N.N. Water supply / N.N. Abramov. – M.: Stroyizdat. 1974. – 480 p.

13. Abramov, N.N. Calculation of water supply networks / N.N. Abramov. – M.: Stroyizdat, 1976. – 304 p.

14. Abramov, N.N. Theory and methodology of calculation of water supply and distribution systems / N.N. Abramov. – M.: Stroyizdat, 1972. – 287 p.

15. Abramovich, I.A. Some issues of adjustment of design standards / I.A. Abramovich, G.N. Semchuk // Water supply and sanitary equipment. – 1995. – No. 12. – P. 15–16.

16. Belan, A.E. Water supply technology / A.E. Belan. – Kiev: Naukova dumka. 1985. – 263 p.

17. Belan, A.E. Design and calculation of water supply devices/ A.E. Belan, P.D. Khoruzhiy. – 2nd ed., reprint. and add. – Kiev: Budivelnik, 1981. – 190 p.

18. Galperin, E.M. Calculation of the ring water supply network taking into account the actual conditions / E.M. Galperin // Water supply and sanitary equipment. – 1992. – No. 5. – P. 26–27.

19. Dmitriev, A.V. Urban engineering networks / A.V. Dmitriev, A.B. Ketaev. – M.: Stroyizdat, 1988. – 175 p.

20. Kalitsun, V.N. Hydraulics, water supply and sewerage / V.N. Kalitsun, Yu.M. Lasikov. – M.: Stroyizdat, 2000. – 417 p.

21. Nikoladze, G.I. Water supply / G.I. Nikoladze, M.A. Somov. – M.:Stroyizdat, 1995. – 688 p.

22. Chupin, V.R. Modeling and optimization of pipeline systems of public utilities / V.R. Chupin, D.I. Maizen, R.V. Chupin // Vestnik IrGTU. – 2008. – Vol.1, No. 1. – P. 169–180.

23. Dond, H. Optimized sewer design reduces costs / H. Dond // Water and Sewage. – 1980. – Reference number.

24. Donidjian A.S. Jr. and U.S. Huber. Modeling of water quality from point sources in urban and non-urban areas, 1991. EPA/600/3-91/039 , United States Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, 30605.

25. Hiszo, G. Seismic Response Analyses of Joint -Connected Buried Pipelines Including Bent Sections / G. Hiszo, S. Mocata, K. Hicoyki, J. Jutaki // Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. – 1982. – Vol. 44, №1. – P.182–221.

26. Kloss, H. Solving the problem of non-water supply and sewerage systems / H. Kloss, M. Roman // Gas, water and sanitary equipment. – 1974. – No.9. – 2008. – P. 34–51.

27. O'Rurke, M.I. Transverse Seismic Wave at Pipeline Junctions / M.I. O'Rurke, R.R. Picul, L.R.L. Wang // Techn Counc. ASCE Proc. – 1982. – Vol.108, №1. – P. 173–177.

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

Баканова Светлана Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail SvBakanova@mail.ru

Фролов Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail mihaile-frolovv@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*

Bakanova Svetlana Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Heatgas Supply and
Ventilation»
E-mail SvBakanova@mail.ru

Frolov Mikhail Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Heatgas Supply and
Ventilation»
E-mail mihaile-frolovv@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

С.В. Баканова, М.В. Фролов

Приводятся тепловой и воздушный балансы при воздушном охлаждении в приложении к овощехранилищам. Уточняются факторы, влияющие на эффективность систем воздушного охлаждения. Описывается методика определения расчетного воздухообмена при хранении скоропортящейся сельхозпродукции с учетом реальной неравномерности поля температур в штабеле или насыпи продукции с гарантированной заданной надежностью. Предлагается показатель качества и эффективности способа организации воздухораспределения.

Ключевые слова: воздушное охлаждение, тепловой баланс, овощехранилище, методика расчета, теплопоступления, воздухообмен, показатели качества и эффективности

EVALUATION OF AIR COOLING EFFECTIVENESS

S.V. Bakanova, M.V. Frolov

Thermal and air balances for air cooling of vegetable storages are given. The factors influencing the efficiency of air cooling systems are clarified. A method is proposed for determining the calculated air exchange during storage of perishable agricultural products, taking into account the real unevenness of the temperature field in a stack or mound of products with guaranteed specified reliability. An indicator of the quality and efficiency of the method of organizing air distribution is proposed.

Keywords: air cooling, heat balance, vegetable storage facilities, calculation methods, heat input, air exchange, quality efficiency indicators

Для хранения выращенной сельскохозяйственной продукции насыпью или в штабеле обычно на практике используют системы воздушного охлаждения. Такие системы в приложении к овощехранилищам расположены по всей территории нашей страны. В настоящее время все больше внимания привлекают системы, которые работают на базе инновационных технологий, обеспечены системами автоматизированного контроля и управления, энергоэффективны. Следует однако помнить, что насыпь или штабель хранимых овощей и фруктов является «дышащим» продуктом. Взаимосвязь их с окружающей средой осуществляется в основном через дыхательный газообмен. В результате хранения овощи и фрукты выделяют в воздух помещения тепло и углекислоту. Основными параметрами, определяющими интенсивность дыхания, являются подвижность окружающего воздуха, относительная влажность и температура.

При расчетах систем воздушного охлаждения необходимо учитывать тепло- и массообменные процессы, происходящие в слое хранимой продукции [1]. Очень важно для инженерных расчетов учитывать тепловые потоки, которые вносят существенный вклад в температурный баланс овощехранилища. Уравнение теплового баланса овощехранилища, предназначенное для определения мощности систем воздушного охлаждения, имеет вид:

$$\sum Q = Q_T + Q_{\Pi} + Q_B + Q_{OB} + Q_{Л}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где Q_T – теплоприток через ограждающие конструкции охлаждаемого помещения, Вт; Q_{Π} – тепло, выделяемое хранимой продукцией, Вт; Q_B – теплоприток, вносимый наружным воздухом при вентиляции овощехранилища, Вт; Q_{OB} – теплоприток от работающего оборудования и освещения, Вт; $Q_{Л}$ – теплоприток от работающих людей, Вт.

Теплоприток Q_T через ограждающие конструкции определяют следующим образом:

$$Q_T = A(t_n - t_b) \cdot k, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где A – площадь ограждающих конструкций, м^2 ; t_n – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; t_b – температура внутри охлаждаемого помещения, $^{\circ}\text{C}$; k – коэффициент теплопередачи ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Температуры t_n и t_b при расчетах принимают в зависимости от района расположения овощехранилища и вида охлаждаемой продукции. Влияние солнечной радиации учитывают увеличением разности температур $(t_n - t_b)$ на величину дополнительного температурного напора $\Delta t_{\text{сол.рад}}$, вызванного радиацией:

$$\Delta t_{\text{сол.рад}} = \frac{q_{\text{сол.рад}} \cdot \varepsilon}{\alpha_n}, \text{ } ^{\circ}\text{C}, \quad (3)$$

где $q_{\text{сол.рад}}$ – интенсивность солнечного облучения, $\text{Вт}/\text{м}^2$, принимают в зависимости от района равной, например для южных регионов, для горизонтальных поверхностей $1050 \text{ Вт}/\text{м}^2$; для вертикальных – $720 \text{ Вт}/\text{м}^2$; ε – коэффициент поглощения лучистой энергии, зависящий от материала, равный, например, для стен светлой окраски 0,12–0,30, для темной окраски – 0,97–0,99; α_n – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к воздуху, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Зная площади ограждающих конструкций овощехранилища, соответствующие им температурные перепады и коэффициенты теплопередачи, рассчитывают суммарный теплоприток через наружные ограждения.

Количество тепла, выделяемое от хранимой сельхозпродукции, определяется следующим выражением:

$$Q_{\Pi} = \frac{(G_{\Pi} \cdot C_{\Pi} + G_T \cdot C_T)(t_{\text{шт}} - t_b)}{\alpha}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где G_{Π} , G_T – масса соответственно продукции и тары, кг; C_{Π} , C_T – теплоемкость соответственно продукции и тары, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$, принимаем по таблицам; $t_{\text{шт}}$ – начальная температура продукции в штабеле, $^{\circ}\text{C}$; t_b – нормируемая температура воздуха в хранилище, $^{\circ}\text{C}$; α – время охлаждения.

Для теплопритока, связанного с вентиляцией, справедливо:

$$Q_B = \frac{V_{\text{пом}}}{24 \cdot 3600} n_{\text{вент}} \cdot \rho_n \cdot C_p (t_n - t_b), \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $V_{\text{пом}}$ – объем охлаждаемого овощехранилища, м^3 ; $n_{\text{вент}}$ – число обменов воздуха в сутки, для хранимых овощей и фруктов принимается 2-4; ρ_n – плотность наружного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Теплопритоки от работающих механизмов и осветительных приборов складываются из тепловыделений, эквивалентных мощности, передаваемой воздуху охлаждаемого помещения:

$$Q_{\text{об}} = N_{\text{мех}} \cdot \Psi_{\text{мех}} + N_{\text{осв}} \cdot \Psi_{\text{осв}}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где $N_{\text{мех}}$, $N_{\text{осв}}$ – мощности механизмов и осветительных приборов, работающих в овощехранилище; $\Psi_{\text{мех}}$, $\Psi_{\text{осв}}$ – коэффициенты одновременности работы механизмов и освещения, принимаются равными от 0,4 до 1,0.

Теплоприток от работающих людей

$$Q_{\text{л}} = q_{\text{л}} \cdot n_{\text{л}} \cdot \tau_{\text{л}} \cdot \frac{1}{24}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где $q_{\text{л}}$ – тепловыделения одного работающего человека в сутки, Вт; $n_{\text{л}}$ – число работающих людей; $\tau_{\text{л}}$ – время пребывания людей в овощехранилище в течение суток, ч.

Следует заметить, что теплопритоки, не поддающиеся расчету, учитывают поправочным коэффициентом $K_q = 1,05 \div 1,1$.

Тепловая нагрузка на холодильную машину в итоге составит:

$$\sum Q = (Q_{\text{т}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{об}} + Q_{\text{л}}) \cdot K_q, \text{ Вт}. \quad (8)$$

Для инженерных расчетов необходимо учитывать только те тепловые потоки, которые вносят существенный вклад в тепловой баланс овощехранилища. Эффективность систем воздушного охлаждения при хранении скоропортящейся сельскохозяйственной продукции оценивают, как правило, превышением температуры воздуха на выходе из слоя продукции ($\Delta t_{\text{шт}}^{\text{yx}} = t_{\text{шт}}^{\text{yx}} - t^{\text{np}}$) и сравнивают ее с нормируемой величиной ($\Delta t_{\text{шт}}^{\text{н}} = t_{\text{шт}}^{\text{н}} - t^{\text{np}}$) из условия, что $\Delta t_{\text{шт}}^{\text{yx}} \leq \Delta t_{\text{шт}}^{\text{н}}$. Расход воздуха, который следует подавать в овощехранилище, определяют из условия поддержания в слое хранимой продукции нормируемого перепада температур [2]:

$$G = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta t_{\text{шт}}^{\text{н}}}, \text{ кг/с}, \quad (9)$$

где $\Delta t_{\text{шт}}^{\text{yx}}$ – разность температур воздуха, удаляемого из слоя продукции, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{шт}}^{\text{yx}}$ – температура воздуха, уходящего из слоя продукции, $^{\circ}\text{C}$; t^{np} – температура воздуха, приточного в слой продукции, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{шт}}^{\text{н}}$ – разность температур воздуха в слое продукции нормируемая, $^{\circ}\text{C}$; G – расход воздуха, кг/с , подаваемый системами воздушного охлаждения в слой продукции; C_p – удельная изобарная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

В работе [2] для расчета требуемого объема воздуха и сопротивления различных систем воздухораспределения предложено использовать температурный симплекс:

$$G = \frac{m_{\Delta t} \cdot Q}{C_p \cdot \Delta t_{\text{шт}}^{\text{н}}}, \text{ кг/с}, \quad (10)$$

где $m_{\Delta t} = t_{\text{шт}}^{\text{cp}} - t^{\text{np}} / t^{\text{yx}} - t^{\text{np}}$ или $\frac{1}{m_{\Delta t}} = K_3$.

Установлено [2], что величина $m_{\Delta t}$ многофакторная, зависящая от количества поданного воздуха, схемы организации воздухообмена, высоты помещения, высоты штабеля продукции и т.д. Следует отметить, однако, что по величине $K_{\Sigma}(m_{\Delta t})$ нельзя строго говорить о качестве организации воздухообмена, поскольку не учитывается неравномерность поля распределения температур в слое хранимой продукции. В известной мере это случайная величина. Изучив процесс фильтрации внутриштабельного воздуха в слое хранимой сельхозпродукции и подвергнув всесторонней статистической оценке, предлагаем расчетный воздухообмен определять как:

$$G = \frac{m_{\Delta t} \cdot Q(1 + x^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t})}{C_p \cdot \Delta t_{шт}^H}, \text{ кг/с}, \quad (11)$$

где x^* – нормированный аргумент, учитывающий неравномерность (по объему штабеля) и вероятностный закон распределения поля температур; $\bar{\sigma}_{\Delta t} = \frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t_{шт}^{cp}}$ – «вентиляционный коэффициент вариации» – отношение среднего квадратичного отклонения случайного параметра к его среднеизбыточному.

ВЫВОДЫ

1. Предложена обоснованная методика определения расчетного воздухообмена при хранении скоропортящейся сельскохозяйственной продукции с учетом реальной неравномерности поля температур в штабеле или насыпи хранимой продукции с гарантированной заданной надежностью x^* и $t_{шт} \leq t_{шт}^H$.

2. Предложена характеристика системы воздухораспределения показателем ее эффективности:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{m_{\Delta t} (1 + x^* \cdot \sigma_{\Delta t})}. \quad (12)$$

Показатель эффективности включает в себя характеристику надежности, поскольку x^* соответствует определенной вероятности превышения $t_{шт,i}$ над $\Delta t_{шт}^H$. При этом величина $1/(1 + x^* \cdot \sigma_{\Delta t})$ является показателем качества:

$$K_{\text{кач}} = \frac{1}{1 + x^* \cdot \sigma_{\Delta t}} \leq 1. \quad (13)$$

Последнее обусловлено тем, что качество и эффективность должны быть взаимозависимыми.

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{кач}}}{m_{\Delta t}}. \quad (14)$$

3. Для сопоставления вариантных решений воздухораспределения при заданных гарантиях расчета $K_{\text{эф}}$ и $K_{\text{кач}}$ могут быть использованы в качестве объективных показателей. По своему физическому содержанию они отражают степень несовершенства реального способа организации воздухораспределения по сравнению с «идеальным».

Список литературы

1. Калашников, М.П. Исследование состояния воздушной среды в зданиях для хранения скоропортящейся продукции / М.П. Калашников // Известия вузов. Строительство. Недвижимость. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 206–211.

2. Баканова, С.В. Воздушное охлаждение в помещениях хранения скоропортящейся продукции / С.В. Баканова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 120 с.
3. Таурит, В.Р. Совершенствование расчета процесса охлаждения насыпи овощей, устанавливающего оптимальные сочетания параметров активной вентиляции в хранилищах секционного типа / В.Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – №3(74). – С.112–117.
4. Таурит, В.Р. Снижение энергетических ресурсов при охлаждении насыпи экологически чистой овощной продукции / В.Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – №2(67). – С.161–167.

References

1. Kalashnikov, M.P. Investigation of the state of the air environment in buildings for the storage of perishable products // M.P. Kalashnikov // Izvestiya vuzov. Construction. Realty. – 2020. Vol. 10, № 2. – P. 206–211.
2. Bakanova, S.V. Air cooling in the storage rooms of perishable products / S.V. Bakanova. – Penza.: PGUAS, 2012. – 120 p.
3. Taurit, V.R. Improving the calculation of the cooling process of a mound of vegetables, which establishes optimal combinations of active ventilation parameters in sectional type storages / V.R. Taurit // Bulletin of Civil Engineers. – 2019. – №3(74). – P. 112–117.
4. Taurit, V.R. Reduction of energy resources when cooling an embankment of environmentally friendly vegetable products / V.R. Taurit // Bulletin of Civil Engineers. – 2018. – №2(67). – P. 161–167.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72:573

DOI 10.54734/20722958_2024_2_189

*Государственный университет
землеустройства*

Россия, г. Москва, ул. Казакова, 15

Плешивцев Александр Александрович,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Основы архитектуры»

E-mail: perspektiva-aa@mail.ru

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Король Елена Анатольевна,

доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН, лауреат
премии Правительства РФ, зав. кафедрой
«Организация и реновация производства»
E-mail: professorkorol@mail.ru

*Казанский (Приволжский) федеральный
университет*

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Сабитов Линар Салихзанович,

доктор технических наук, доцент,
советник РААСН

E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

*Московский государственный университет
технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (Первый казачий
университет)*

Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой «Защита
в чрезвычайных ситуациях»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

State University of Land Management»

Russia, Moscow, 15, Kazakova St.

Pleshivtsev Aleksander Aleksandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Basic Architecture»

E-mail: perspektiva-aa@mail.ru

*National Research Moscow State Building
University*

Russia, Moscow, 26, Yaroslavlshosse

King Elena Anatolyevna,

Doctor of Sciences, Professor,
Corresponding member of RAASN, Winner of
the award of the Government of the Russian
Federation, Head of the Department
«Organization and renovation of production»
E-mail: professorkorol@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, 18, Kremlevskaya St.

Sabitov Linar Salikhzanovich,

Doctor of Sciences, Associate Professor,
Advisor to RAASNE

E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

*Moscow State University of Technology and
Management named after K.G. Razumovsky
(first Cossack University)*

Russia, Penza, 6, Volodarskogo St.

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Candidate of
Historical Sciences, Head of the Department
«Protection in Emergency Situations»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

АРХИТЕКТУРНО-БИОНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОТОБРАЖЕНИЮ ФУНКЦИЙ И ФОРМ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.А. Плешивцев, Е.А. Король, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Отмечено, что получившая широкое распространение доктрина о смене эпохи физики (двадцатый век цивилизационного развития) эпохой биологии носит глобальный характер и предполагает приход принципиальных, революционных изменений практически во все области человеческой деятельности, включая и архитектуру. Рассмотрены

вопросы развития теории и практики архитектурной деятельности, связанные с применением архитектурно-бионического подхода к организации архитектурного пространства. Проведен анализ основных современных направлений развития бионики (биотопии) как комплексной и междисциплинарной отрасли знания и приведена их классификация.

Ключевые слова: архитектурная бионика, устойчивая архитектура, архитектурная бионика, природные образования, архитектурные объекты, инновации, технологии, междисциплинарная область знания

ARCHITECTURAL AND BIONIC APPROACH TO DISPLAYING FUNCTIONS AND FORMS OF ARCHITECTURAL OBJECTS

A.A. Pleshivtsev, E.A. Korol, L.S. Sabytov, I.N. Garkin

A widespread doctrine of the change the era of physics (the twentieth century of civilizational development) by the era of biology is global in nature and implies the arrival of fundamental, revolutionary changes in almost all areas of human activity including architecture. The article discusses the development of theory and practice of architectural activity related to application of architectural and bionic approach to organization of architectural space. Analysis of the main modern directions of development the bionics (biotopy) as a comprehensive and interdisciplinary branch of knowledge has been carried out and their classification is given.

Keywords: biotopy (bionics), sustainable architecture, architectural bionics, natural education, architectural objects, innovation, technology, interdisciplinary field of knowledge

История архитектурной деятельности неразрывно связана с изучением и практическим применением свойств и состояний «живой и неживой природы» с целью осмысленного преобразования окружающего пространства. Признание гармоничности и практичности особенностей природных образований, а также их пригодности для организации архитектурного пространства различного назначения является результатом последовательного эволюционного развития теоретических знаний архитектурной науки, материалов и технологий [1, 2].

Генезис творческой, преобразовательной деятельности, начавшийся с наиболее древних периодов цивилизационного развития от буквального копирования природных форм и применения материалов природного происхождения привел к «ренессансу» современных представлений об архитектонике природных образований, пригодных для отображения пространственных и функциональных особенностей объектов архитектурного пространства.

Пристальный современный интерес архитектурной науки (теории и практики) к анализу особенностей организации и функционирования природных образований вызван тем обстоятельством, что мировое пространство больше не окружает архитектуру, скорее наоборот, это архитектура охватывает весь доступный мир. Точно так же конфликт между естественным и искусственным в окружающем пространстве стал полностью сегодня размытым в контексте условий организации постоянно уменьшающегося масштаба доступного жизненного пространства. Таким образом, формирование и утверждение феномена «техно-природы» стало отображением взаимодействия и компромиссного состояния баланса природного и технического доменов [3].

Концепция освоения и практического применения принципов организации форм и способов взаимодействия элементов природных образований и их отображение в практической деятельности (известная как биотопия, бионика, «*biotopia*», «*bionics*») подразумевает не столько формальное копирование свойств и состояний природы, но раскрытие и предметное овеществление связей между установленными закономерностями развития окружающего мира и перспективными направлениями формирования предметов искусственного пространства [4, 5].

На рис. 1 представлена классификация основных направлений биотопии (бионики).

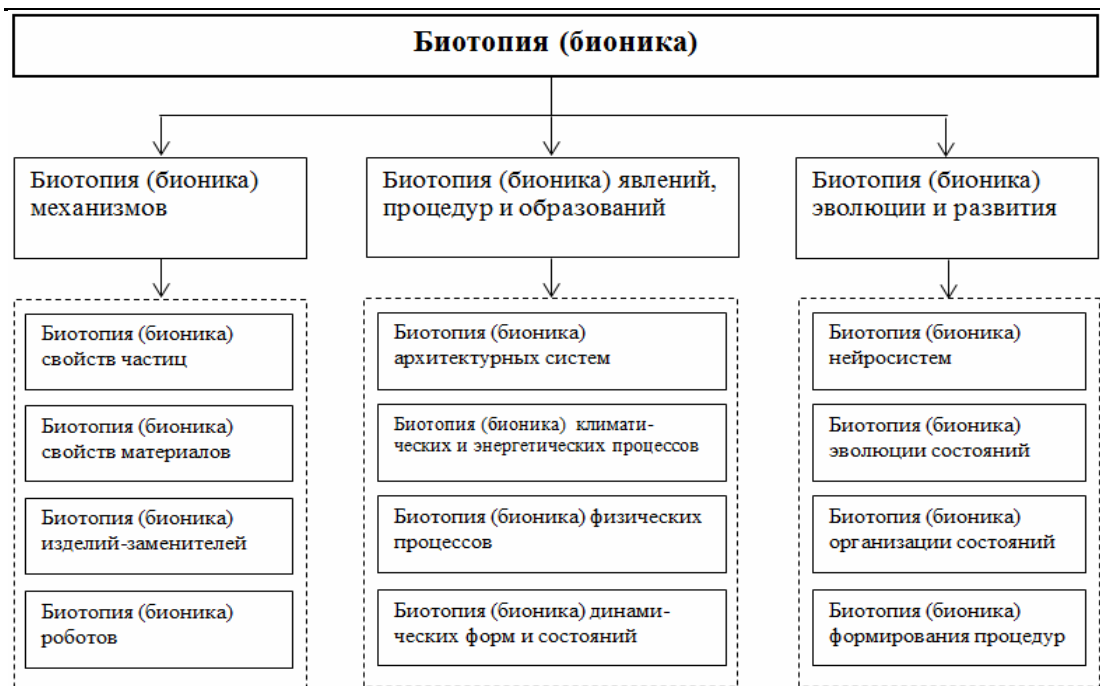


Рис. 1. Классификация основных современных направлений биотопии (бионики)

Концепция архитектурной (архитектурно-строительной) деятельности, связанная с поиском и реализацией решений архитектурных (градостроительных) задач «... с помощью патентов живой природы», предусматривает методологию последовательного приложения системы теоретических и прикладных приемов архитектурной бионики («*architectural bionics*») [6, 7]:

- исследования объектов живого мира с целью выявления определенных особенностей реализации структуры-функции у определенных видов животных и растений;
- абстрагирования принципов организации и реализации структуры-функции искусственного образования (архитектурного объекта) от особенностей реализации соответствующего «биологического прототипа»;
- адекватной технической и технологической имплементации принципов структуры-функции исходного природного образования в проектные (композиционные, конструктивные и художественно-эстетические) решения.

На рис. 2 представлен пример последовательной реализации принципов архитектурной бионики в контексте отображения архитектурного представления формы и функции архитектурной системы.

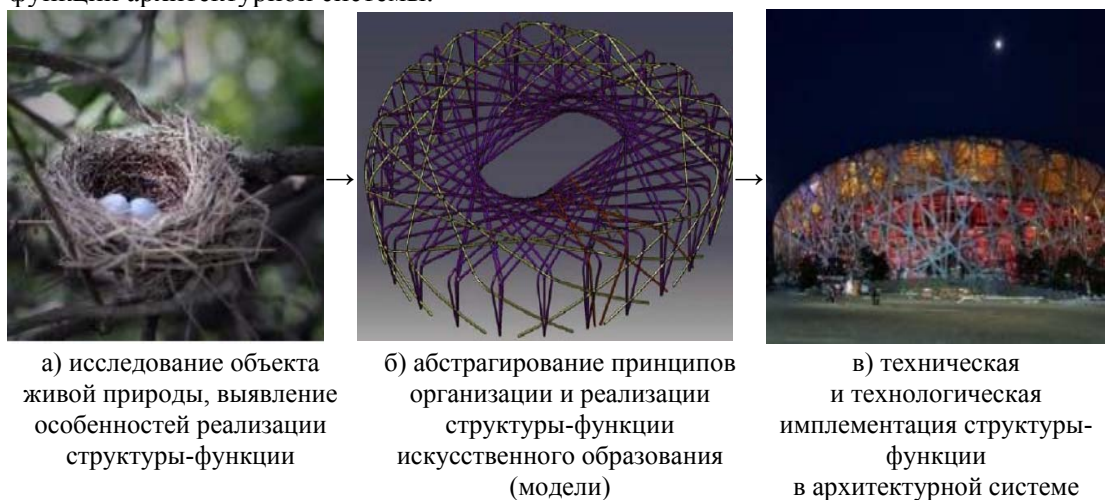


Рис. 2. Пример применения методологии бионики для архитектурного представления формы и функции архитектурной системы

Архитектурная бионика означает новую междисциплинарную область знаний, которая сочетает в себе биологию, технику, технологии, архитектурную композицию и математическое моделирование – необходимые составляющие, которые позволяют реализовать принципы устойчивой архитектуры [8, 9].

Схематическое отображение методологического представления бионики как комплексной, системной и междисциплинарной области теории и практики архитектурной деятельности представлено на рис. 3.

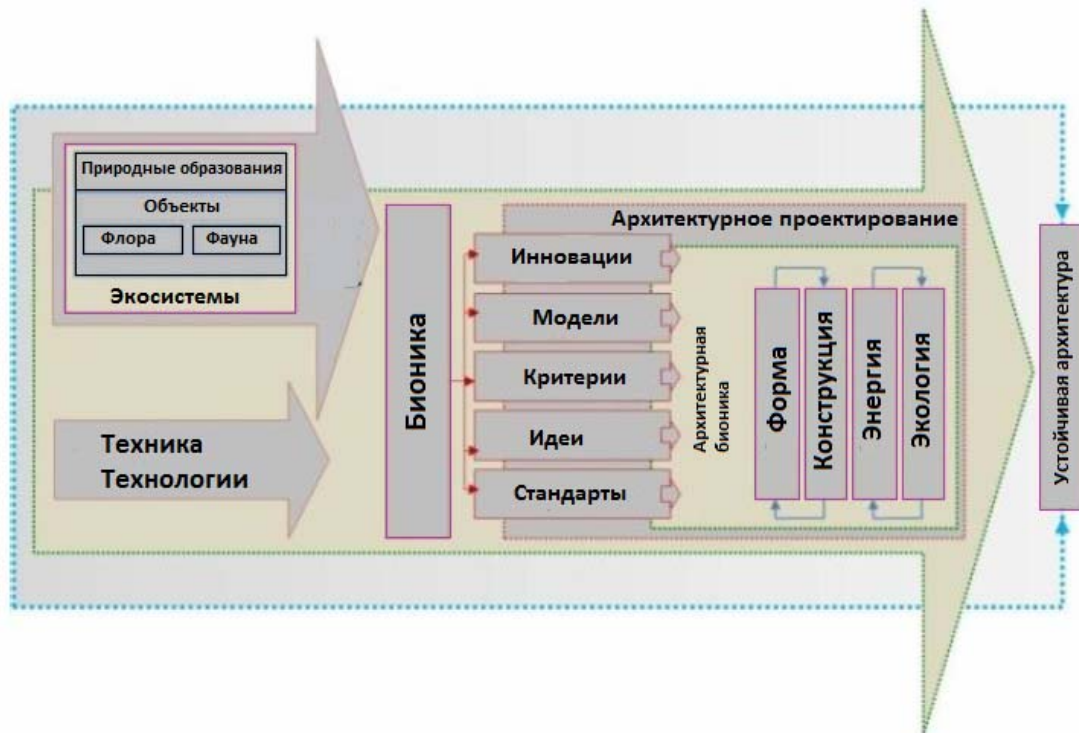


Рис. 3. Методологическая схема бионики в контексте архитектурной деятельности

Биотопия позволяет представить идеальную организацию устойчивого архитектурного пространства, характеризующегося признаками дезурбанистических идей [10].

Одной из значительных особенностей биотопии является отображение возможного развития в будущем или попытка продемонстрировать альтернативную версию настоящего и архитектуру современных систем расселений из условий приоритетного учета влияния экологических, энергетических и природно-климатических факторов на городскую среду. Целостные архитектурные решения должны исходить из приоритетного удовлетворения жизненных функций человека, а не подчинения их рациональным городским условиям и «целесообразным» архитектурным формам.

Концепция освоения принципов организации форм и способов взаимодействия элементов живой природы в архитектурной (градостроительной) деятельности подразумевает не столько формальное отображение сторон живой природы (аналогичное функционально-утилитарным сторонам архитектуры), но раскрытие и предметное овеществление связей между установленными закономерностями развития живого мира и перспективными направлениями теории и практики архитектуры.

Выводы

Архитектурная деятельность в определенной мере возвращается к приемам архитектуры доисторического периода, которая в большинстве случаев «прямо» и «наивно» воспроизводила природные решения на протяжении тысячелетий, обращая полученный опыт в каноны творчества и традиционные архитектурные системы, но на принципиально новом, технологическом уровне развития.

Идеи биотопии (в формате архитектурной бионики) способны оказывать революционное влияние на современное состояние и перспективные направления развития архитектурной науки, в которых соответствующие приемы и технологии приняты по

результатам анализа форм, процессов и явлений, «заимствованных» из природного окружения.

Вместе с тем наличие «эффективных природных примеров» нельзя считать единственно целесообразным, безусловным или достаточным обоснованием для решения проблемной проектной ситуации в архитектурной деятельности. Природные процессы и явления, в особенности скрытые от доступного и поверхностного представления, требуют значительно более системных и разнообразных исследований, чем самая сложно организованная искусственная последовательность.

«Бионический подход» к формированию архитектурного пространства вполне может быть использован в качестве базисного уровня или критерия оценки эффективности проектных решений и соответствия принципам устойчивой архитектуры.

Список литературы

1. Villesenor, D. *Architecture and nature* / D. Villesenor. – New York: Rizzoli, 2015. – 334 p.
2. Попов, А.О. Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «ОРЕШЕК» Шлиссельбургской крепости / А.О. Попов, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 199–205.
3. Калмыкова, О.М. Технологические парадигмы XX–XXI вв.: философско-концептуальный анализ: автореферат дис. ... кандидата философских наук: 09.00.08 / О.М. Калмыкова. – Ростов-на-Дону, 2012. – 24 с.
4. Чижев, А.А. Бионика как необходимый новый вектор развития / А.А. Чижев, М.А. Чижова // Интерактивная наука. – 2020. – №3. – С.8–16. – DOI 10.21661/r-552948.
5. Werner, Nachtigall. *Bau-Bionik. Natur – Analogien – Technik* / Nachtigall Werner, Pohl Göran. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 289 p.
6. Cervera, María Rosa. *Bionic Architecture: Learning from Nature* / María Rosa Cervera, Javier Pioz. – Madrid: By Architect Publications, 2015. – 384 p.
7. Нагаева, З.С. Бионическая архитектура / З.С. Нагаева, А.А. Голикова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – №17 (69). – С.7–13.
8. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №. 6. – С. 9–25.
9. Шамбина, С.Л. Применение бионического формообразования и методов аналитической геометрии в современном архитектурном проектировании / С.Л. Шамбина, А.А. Казарян // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – №1. – С.11–20.
10. Мирхасанов, Р.Ф. От «чугунной архитектуры» к металлическому каркасу / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1(54). – С. 178–185.

References

1. Villesenor, D. *Architecture and nature* / D. Villesenor. – New York: Rizzoli, 2015. – 334 p.
2. Popov, A.O. A systematic approach to the analysis of the technical condition of cultural heritage objects using the example of the “ORESHEK” building of the Shlisselburg Fortress / A.O. Popov, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov, A.M. Danilov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4 (57). – P. 199–205.
3. Kalmykova, O.M. Technological paradigms of the XX – XXI centuries: philosophical and conceptual analysis: abstract of thesis candidate of Philosophy: 09.00.08 / O.M. Kalmykova. – Rostov-on-Don, 2012. – 24 p.
4. Chizhov, A.A. Bionika as a necessary new vector of development / A.A. Chizhov, M.A. Chizhova // Interactive science. – 2020. – No.3. – P. 8–16. – DOI 10.21661/r-552948.

-
5. Werner, Nachtigall. Bau-Bionik. Natur – Analogien – Technik / Nachtigall Werner, Pohl Göran. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 289 p.
 6. Cervera, María Rosa. Bionic Architecture: Learning from Nature / María Rosa Cervera, Javier Pioz. – Madrid: By Architect Publications, 2015. – 384 p.
 7. Nagaeva, Z.S. Bionic architecture / Z.S. Nagaeva, A.A. Golikova // Construction and technogenic safety. – 2019. – No.17 (69). – P.7–13.
 8. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – No. 6. – P.9–25.
 9. Shambina, S.L. Application of bionic shaping and analytical geometry methods in modern architectural design / S.L. Shambina, A.A. Ghazaryan // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2015. – No.1. – P.11–20.
 10. Myrkhasanov, R.F. From «cast iron architecture» to a metal frame / R.F. Myrkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 1(54). – P. 178–185.

УДК 72.012.22

DOI 10.54734/20722958_2024_2_195

Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского.

Россия, 295007, г. Симферополь,
проспект Академика Вернадского, 4

Ванюшкин Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Мировая экономика»
E-mail: vanyushkin2@yandex.ru

Crimean federal university
named after V.I. Vernadsky

Russia, 295007, Simferopol,
4, Academician Vernadsky Avenue

Vanyushkin Aleksander Sergeevich,
Doctor of Sciences, Associated Professor,
Professor of the Department «World
Economics»
E-mail: vanyushkin2@yandex.ru

СИСТЕМА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕАТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЕДИНИЦ

А.С. Ванюшкин

Предложены концептуальные подходы к формированию архитектурного облика креативных пространственных единиц, обеспечивающие их единство и многообразие и исключающие монотонность среды. Выявлены основные отраслевые направления формирования креативных пространственных единиц, являющиеся материальным аспектом самоидентификации для привлекаемых творческих работников. В целях обеспечения многообразия планировочных решений разработаны возможные варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы. Проанализирована гибкость этих вариантов с вариативной, коммуникативной и адаптивной позиций. На данной базе предложена система топологических характеристик креативных пространственных единиц, использование которой позволит обеспечить широкое разнообразие их архитектурного облика.

Ключевые слова: креативные пространственные единицы, архитектурный облик, самоидентификация, единство и разнообразие, гибкость, композиционный замысел

THE SYSTEM OF TOPOLOGICAL CHARACTERISTICS AS THE BASIS FOR FORMING CREATIVE SPATIAL UNITS

A.S. Vanyushkin

Conceptual approaches for forming architectural shape of creative spatial units, which provide their unity and diversity and exclude monotony of environment are proposed. The basic sectoral segments of forming creative spatial units which reflect material aspect of self-identification for attracted creative specialist, are determined. For the purposes of providing diversity of layout solutions the possible variants of compositional concept of a creative spatial unit are elaborated. Flexibility of these variants with variable, communicative and adaptive positions is analyzed. On this basis the system of topological characteristics of creative spatial units is proposed, the use of which will provide great diversity of their architectural appearance.

Keywords: creative spatial units, architectural appearance, self-identification, unity and diversity, flexibility, compositional concept

Введение. Одной из современных тенденций в сфере градостроительства является насыщение территорий городов, их районов и кварталов общедоступными общественными и креативными пространствами. Общеизвестно, что насыщение общественными пространствами как территориями общего доступа, свободными от транспорта, позволяет повысить комфортность городской среды. Одним из видов общественных пространств являются креативные, и их отличие заключается в том, что они предназначены для свободного самовыражения, творческой деятельности людей, часто в тесном взаимодействии друг с другом. В последнем случае говорят уже о креативных кластерах, которые являются одним из видов креативных пространств.

Растущая популярность креативных кластеров обусловлена целями их создания: это формирование творческой среды; генерация новых рабочих мест; вывод территорий из депрессивного состояния; повышение их туристической привлекательности [1, с.650]. С урбанистических позиций целями создания креативных пространств являются «трансформация городской среды»; создание «третьих мест» для общения творческих людей; препятствование их оттоку и способствование притоку в регион [2, с.2–3]. Кроме того, креативные кластеры подходят для апробации новых архитектурно-строительных решений.

Креативные пространства и кластеры отличаются разнообразием форм: loft, co-working, арт-пространство / арт-квартал с галереями, центры искусства, торговые улицы (retail street), мастерские (workshop), центры моды и дизайна, пространства креативного досуга [1, с.651; 2, с.3], несколько реже – научно-исследовательская лаборатория [3, с.121]. При этом креативный досуг отличается нестандартным и творческим подходом к его организации. К креативным видам досуга относят квесты, тематические праздники, вечеринки, обучение разным видам народных ремесел, способам приготовления блюд национальной / местной кухни, кройки и шитью, игре на музыкальных инструментах и др.

Как показывает зарубежная и отечественная практика, креативные пространства и даже кластеры по отдельности не могут дать значимый социально-экономический эффект для города, а тем более региона. Нужна определенная «критическая масса» креативных пространств и/или кластеров, чтобы их вклад в развитие города / региона стал заметным [4]. Часто развитие креативных индустрий в городе / регионе осуществляется стихийным образом, когда отдельные пространства не связаны друг с другом в единое целое и располагаются хаотично и дискретно в зависимости от договоренностей между арендаторами и арендодателями соответствующих помещений. При этом подобные отдельные креативные пространства, как правило, не оказывают значимого влияния на жизнедеятельность пространственных единиц как территорий их размещения. А дискретно размещенные креативные пространства в пределах одной и той же территории часто оказываются не связанными как друг с другом, так и с другими предприятиями в рамках одной и той же пространственной единицы. Это приводит к необходимости рассмотрения возможностей формирования креативных пространственных единиц.

Пространственные единицы в традиционном понимании содержат центр, в котором сконцентрированы публичные объекты с разными функциями, и монофункциональную периферию (зоны жилья, производства, рекреации) [5]. Креативные пространства и кластеры могут быть вписаны как в ядро, так и в периферию пространственной единицы, но в этом случае сохраняется вышеуказанный недостаток: слабая связанность друг с другом и другими предприятиями на общей единой территории.

Преодоление данного недостатка возможно на базе формулирования единой стержневой идеи формирования всей пространственной единицы, в основе которой лежат креативные индустрии и их кластеры. Сущность последних такова, что они могут иметь связь практически с любой отраслью экономики. Такая связь может иметь форму разнообразных инновационных разработок, решений, предназначенных для применения в той или иной традиционной отрасли экономики.

Наличие единой стержневой идеи, признаваемой сообществом жителей на той или иной территории, есть не что иное как самоидентификация. Именно самоидентификация является краеугольным камнем для сообществ креативных людей, а одним из основных ее аспектов является «облик архитектурного пространства», «региональная градостроительная идентичность» [6, с.157; 7, с.168]. Здесь на первый план выступают понятия «художественно-образного начала» и «эстетической функции», «поля смыслов» [8, с.61; 9, с.7-8; 10, с.171]. Они с позиций самоидентификации превалируют над функционалом, не противореча ему. Однако современному стилю архитектуры присущи «повторы приемов, однообразие градостроительных схем», свидетельствующие о «попадании в тупик» [11, с.11-13]. При этом современные тенденции архитектуры в виде концепций: «15-минутного», «компактного», «зеленого» города, «городских деревень» [12, с.156-157; 13, с.100-101], «городов будущего» [14], «многофункциональных жилых планировочных единиц» [15], «гибридных пространств» [16] сами

по себе не являются решением указанной проблемы. Так, перечисленные концепции касаются функционального наполнения, а не художественно-образного начала.

Теоретические основы художественно-образного начала в архитектуре подробно изложены в ряде монографий, в которых рассмотрены вопросы формообразования (морфологии), построения композиции [8, 17]. В этих и других источниках красной нитью проходит фундаментальный тезис о том, что необходим баланс между соблюдением целостности как упорядоченности архитектурной формы и разнообразия элементов композиции. При этом все известные приемы формирования композиции как целого направлены на формирование неповторимого и уникального образа. Разнообразие может достигаться тем, что в разных градостроительных композициях (кварталах, районах) всегда есть возможность варьировать архитектурно-строительные решения таким образом, чтобы исключить вышеупомянутый негатив в виде повторения и однообразия. Если для целостности композиции достаточно выдержать в одном и том же стиле все ее элементы (функциональные зоны), то достижение разнообразия более проблематично, т.к. оно требует наличия целой палитры возможных решений, являющихся комбинациями возможных вариантов оформления составных элементов. Это требует формирования их топологии.

Опора на архитектурную топологию как совокупность «первичных формообразующих принципов» [18, с.206] и подходов к «членению пространства» [8, с.57-58] позволила бы достичь требуемого разнообразия, в т.ч. формирования креативных пространственных единиц. На текущий момент состав необходимых в этих целях «топологических характеристик моделей среды города» («локализация (центр / периферия), дистанция (далеко / близко), границы (открыто / закрыто), структура связей (оси / узлы)» [19, с.38]) явно недостаточен.

Таким образом, требуется разработка системы топологических характеристик, которая бы позволила на ее основе достигать целостности и разнообразия при формировании креативных пространственных единиц.

Результаты и обсуждение

Одним из фундаментальных постулатов является тезис о неразрывности трех уровней архитектуры: материального (функционального), коммуникативно-средового и художественного (эмоционального, символического) [8, с.12, с.24]. Следовательно, сначала требуется определиться с возможным функциональным предназначением (отраслевой направленностью) креативных пространственных единиц как с основой для дальнейшего выстраивания их смыслового образа и единого архитектурного замысла. Исходя из современных тенденций развития сферы услуг, возможен целый ряд вариантов отраслевой направленности креативных пространственных единиц. На наш взгляд, к ним следует отнести: центр моды и дизайна, центр современного искусства, IT-центр (разработка ПО, в т.ч. игр, виртуальная реальность), центр прототипирования и 3D-моделирования (Fab-Lab), экопоселение + агропереработку. Для каждого из указанных отраслевых направлений следует формировать свой индивидуальный образ и единый архитектурный замысел.

Начнем с направления «экопоселение + агропереработка». Креативная составляющая, на первый взгляд, здесь не совсем очевидна. Тем не менее, для нее есть место и ее роль может быть решающей для успеха данного направления. Во-первых, совершенствование технологий в сфере растениеводства и животноводства в рамках концепции органического сельского хозяйства. Во-вторых, совершенствование технологий переработки органического сырья и разработка новых уникальных видов продукции. К ним следует отнести не только продукты питания, но и продукцию смежных отраслей: текстильной (напр., шерсть и изделия из нее: ткани, одежда), парфюмерной (напр., эфирные масла, духи) и т.д. Это позволяет рассматривать экопоселение с элементами агропереработки как межотраслевой кластер, что полезно для его экономической устойчивости. Отсюда единый образ такой креативной пространственной единицы – это экопоселение с органическим сельским хозяйством. В соответствии с мировым и отечественным опытом архитектурное оформление такого образа предпочтительно в виде чередования зон малоэтажной коттеджной застройки и зон

агропромышленного производства с фермами, цехами переработки, вписанными в непрерывную зону зеленых насаждений. Последняя берет свое начало в получившей в последнее время «второе дыхание» концепции «города-сада» Э. Говарда [13, с.99]. В рамках данного образа естественным будет применение элементов т.н. «зеленой» и «бионической» архитектуры, в т.ч. «зеленого» фасада и/или крыши, природоподобных объектов, экоматериалов с целью достижения гармонии с окружающей средой. Это также касается и зеленых санитарно-защитных насаждений, особенно необходимых вокруг животноводческих ферм и цехов переработки. Все вышеперечисленное вместе придаст требуемую оригинальность и уникальность креативной пространственной единице данного типа.

Рассмотрим второе направление – центр моды и дизайна. Термины «мода» и «дизайн» по определению соотносятся с креативом и актуальны для целого ряда отраслей: моделирование и производство одежды и мебели, архитектура и др. Последняя как отрасль, в свою очередь, включает: проектирование частных домов, ландшафтный дизайн, моделирование экстерьера (фасадов) и интерьера. Образ креативной пространственной единицы, заточенный на дизайн, должен иметь соответствующее архитектурное оформление. Поэтому в данном случае особенно вдумчиво следует подходить к вопросу формирования уникального архитектурного стиля. На текущий момент в регионах РФ распространено копирование последних тенденций в архитектуре из столиц (Москва и Санкт-Петербург). В том числе автор наблюдает подобное явление и в Крыму в последних новостройках. Однако такой подход не позволяет сформировать уникальный архитектурный стиль, который должен подчеркнуть яркий особенный образ креативной пространственной единицы и вместе с тем отразить историческую культурную специфику региона. Здесь во весь рост встает проблема противоречия между сложившимися в регионе традициями и новыми веяниями моды в архитектуре, т.е. современными стилями. Одним из способов разрешения указанного противоречия может стать подход «непрямых ассоциаций», «упрощения, деформирования», описанный в [20, с.121]. Однако данный подход, будучи отражением эклектики (в т.ч. в рамках стилей «постмодерн» и «ар-деко»), сам по себе является недостаточным.

Для формирования уникальности креативной пространственной единицы, особенно в рамках направления «мода и дизайн», требуется применение нестандартных архитектурно-градостроительных решений. Ранее уже было упомянуто о неразрывности трех уровней архитектуры, в т.ч. художественного и материального. В данном случае эта неразрывность означает, что любые нестандартные архитектурно-строительные решения следует проверять по критерию стоимости их воплощения в строительных конструкциях. Такая проверка жизненно необходима, т.к. застройку любой пространственной единицы, в т.ч. креативной, будут осуществлять девелоперы, а для них, как и для любого бизнеса, главный критерий – прибыль. Очевидно, что если у девелопера есть выбор между стандартным архитектурно-строительным решением и уникальным, по стоимости кратно превышающим первое, то, скорее всего, застройщик выберет бюджетный вариант, полагаясь на высокую вероятность скорее привлечь покупателей для новых объектов в более дешевом ценовом сегменте.

Таким образом, в рамках креативной пространственной единицы направления «мода и дизайн» желательно разрабатывать нестандартные архитектурно-градостроительные решения, сопоставимые по стоимости со стандартными, типовыми вариантами. Возможно ли это? На наш взгляд, да, при выполнении двух условий: формирования уникальных композиций из нескольких зданий, а также применения стандартных, типовых конструктивных схем, массово используемых в строительстве. При этом уникальность композиции означает не просто оригинальную расстановку зданий, а создание основы для их целостного восприятия. Например, блокировка нескольких однотипных жилых секций в замкнутую линию с образованием внутреннего пространства двора с зелеными насаждениями. Для придания большей оригинальности можно типовые секции делать различными по этажности так, чтобы они образовывали своеобразные «ступени» (на текущий момент такой архитектурные

прием в моде как за рубежом, так и у отечественных застройщиков). Кроме того, возможно блокировать таким образом и разные по назначению здания, например, жилые и выставочные площади. Такой подход вписывается в русло ряда современных градостроительных тенденций. Например, «восстановления квартала и двора» [21, с.143], «комбинации дискретных и периметральных форм (в виде «микрорайона – квартала»)», «локализации общественных пространств и центров для проведения досуга» [15, с.78-80]. Кроме того, жилые единицы могут вмещать в себя не только жилые помещения, но и мастерские, co-working.

Можно ли на основе типовых конструктивных схем создать что-либо уникальное? Да, некоторые из них вполне позволяют это сделать. Так, распространенная каркасно-монолитная конструктивная схема позволяет широко варьировать форму здания в плане и по высоте, выполняя уже упомянутые «ступени», вычленя поверхности отдельных частей фасада и т.д. В последнее время в строительную моду входят модульные ячейки (комнаты, помещения), из которых также вполне возможно выполнить оригинальные по дизайну здания, например с шахматной сдвижкой ячеек в плане и по высоте. Кроме того, промышленностью давно освоен выпуск видов конструкций, перекрывающих большие пролеты и площади: ферм, рам, арок, вантовых покрытий, тонкостенных оболочек и др., применяемых при сооружении общественных зданий. При этом при строительстве выставочных залов для демонстрации достижений моды и дизайна (в т.ч. жилья в стиле loft) целесообразно обойтись первыми тремя (фермы, рамы, арки), поскольку они дешевле последних двух вариантов. Однако если речь заходит об авангардном дизайне, то на текущий момент он ассоциируется с параметрической (алгоритмической) архитектурой с характерными плавными формами, материальное воплощение которых может потребовать применения тонкостенных оболочек и т.д.

Рассмотрим третье направление – IT-центр. В основе направления IT лежит цифровой формат (чередование 0; 1), а также сеть интернет. На наш взгляд, архитектурным отображением этой основы IT могла бы стать группировка жилых блоков для IT-специалистов из ячеек в виде замкнутых контуров (напр., шестиугольных) как образ сети. В центре каждого такого контура следует размещать высотное здание с co-working и офисами, что будет своеобразным отображением цифрового формата (0; 1). Для придания оригинальности и увеличения периметра освещенности (т.е. улучшения функциональности) данное высотное здание целесообразно выполнить в виде фрактальной структуры столбчатого типа (в виде сомкнутых столбов). Подобное фрактальное строение высотного здания позволяет варьировать его форму в плане, добиваясь необходимого разнообразия. Архитектурную стилистику IT-центра, на наш взгляд, следует выдерживать в духе минимализма, который ассоциируется с high-tech стилем: отказ от декора, ненужных деталей, больше света и пространства.

Четвертое направление – центр современного искусства. Здесь на передний план выходит уже упомянутый ранее авангардный дизайн в виде параметрической (алгоритмической) архитектуры. Изначально параметрическая архитектура начала применяться для общественных зданий. В данном случае это касается выставочных залов. Такие сооружения по определению должны быть индивидуальными. В то же время для жилых зданий на текущий момент данный стиль применяется достаточно редко ввиду перспектив существенного удорожания строительства. Одним из примеров применения параметрической архитектуры для жилых зданий являются высотные дома с поворотом последующих этажей относительно предыдущих на определенный угол, что и образует плавные линии ребер такого сооружения. Однако данный подход приводит к существенному удорожанию строительства, потому такие объекты попадают в класс элитного жилья. Вместо такого подхода, на наш взгляд, целесообразнее совместить параметрическую и фрактальную архитектуру. Например, каждая квартира размещается в 2-3 уровня в едином объеме (ячейке), представляющем собой куб / параллелепипед со срезанным верхним углом с образованием ската по типу мансарды. Сам по себе такой объем напоминает стиль «loft». Фрактальный подход в данном случае заключается в том, что каждый верхний этаж сдвигается

относительно нижнего на величину проекции мансардного ската в плане, а на одном и том же этаже ячейки сдвигаются в плане друг относительно друга в шахматном порядке. Из совокупности таких ячеек с указанной расстановкой образуется общий объем, по форме напоминающий сами ячейки. Если за счет постепенного изменения угла наклона мансардных скатов у ячеек на последующих этажах такого здания удастся получить намек на плавную параболическую линию, то это будет уже проявлением параметрической архитектуры. Три-четыре сформированных указанным способом объема далее следует расположить таким образом, чтобы они вместе образовывали подобие пирамиды, пагоды или купола (это даст и разнообразие). В образовавшемся внутреннем свободном пространстве возможно разместить зимний сад. Стоит отметить, что такое уникальное здание будет интересно выглядеть и в рамках центра моды и дизайна.

Последнее, пятое направление – центр прототипирования и 3D-моделирования (или Fab-Lab). Специфика процесса прототипирования и 3D-моделирования предполагает, что он происходит в просторных, но относительно небольших лабораториях (Fab-Lab). Для размещения таких лабораторий лучше всего подходит тип здания, предназначенный для производственных мастерских с перекрываемыми пролетами шириной 12–18 м. Для такой ширины подходит разнообразный типовой конструктив: балки, фермы, рамы. Подобные мастерские-лаборатории интересны в т.ч. тем, что позволяют разместить либо внутри (мезонин), либо на надстроенном этаже (мансарда), либо в боковой пристройке (флигель) жилые помещения в стиле loft, что очень удобно для работников, т.к. это сводит к минимуму необходимые перемещения между домом и местом работы. Это также позволяет варьировать форму здания в плане (линейная, угловая и т.д.) На наш взгляд, в данном случае, также как и для IT-центра, следует придерживаться архитектурного стиля минимализма.

Одним из значимых современных трендов градостроительства является достижение «вариативности и планировочной гибкости» [16, с.88]. Разумеется, данный тренд следует применить и по отношению к формируемым креативным пространственным единицам. На наш взгляд, вариативность и планировочную гибкость здесь следует понимать в трех аспектах:

- коммуникационном – т.е. возможности быстрого перемещения между разными объектами и зонами креативной пространственной единицы за счет минимальных расстояний;

- вариативном – т.е. достижения разнообразия за счет наличия нескольких вариантов архитектурно-планировочных решений, в т.ч. различной расстановки объектов в пространстве, а также компоновки самих зданий из модулей;

- адаптивном – т.е. приспособляемости к изменению рыночной конъюнктуры по продажам / сдаче в аренду площадей объектов за счет возможности внесения изменений в изначальное планировочное решение (сокращение / расширение) без потери целостности композиции.

Что касается объектов и зон креативной пространственной единицы, то они ассоциируются прежде всего с упомянутыми ранее формами креативных пространств, а также со стандартной социальной и досуговой инфраструктуры, жильем и зелеными зонами. Таким образом, креативная пространственная единица будет включать в себя зеленую зону (парк), в пределах которой будут располагаться объекты креативных пространств (от одной до трех форм, в зависимости от направления), а также жилье и инфраструктура.

По традиции, «сердцевиной» пространственной единицы является «крупный ансамбль для проведения культурно-массовых мероприятий, спорта и торговли», при этом торговый и культурный центры располагаются отдельно [22, с.175, с.179]. Распространена концепция «ступенчатого обслуживания» «периодических и эпизодических» потребностей жителей в рамках «системы специализированных центров» [21, с.133-134].

Из этой концепции следует, что могут применяться два разных способа размещения объектов креативных пространств: в едином объеме (сооружении) вне жилой

зоны; в отдельных зданиях в пределах жилой зоны. У обоих вариантов есть свои преимущества и недостатки. У варианта размещения креативных индустрий в едином объеме (сооружении) главным достоинством является концентрация, означающая минимальные расстояния между объектами креативных индустрий и лучшие предпосылки их кластеризации, а также снижение удельной стоимости строительства. В то же время можно выделить два существенных недостатка данного варианта размещения: недостаточную гибкость в виде слабой приспособленности для поэтапного освоения, а также слабую коммуникативную связанность с жилой зоной креативной пространственной единицы. Вариант раздельного размещения креативных пространств в пределах жилой зоны обладает следующими преимуществами: лучшая приспособленность для поэтапного освоения, т.е. гибкость; хорошая коммуникативная связанность с жилой зоной креативной пространственной единицы. В то же время данный вариант размещения обладает двумя существенными недостатками: меньшая концентрация объектов креативных индустрий с некоторой удаленностью их друг от друга и ослабление предпосылок для их кластеризации. Как видно, в обозначенных вариантах размещения креативных пространств преимущества и недостатки меняются местами.

Опираясь на вышеупомянутую концепцию ступенчатого обслуживания, полагаем возможным комбинировать оба рассматриваемых варианта размещения за счет разделения потребностей в объектах и формах креативных пространств на периодические и эпизодические. Такие формы и объекты креативных пространств, как loft, co-working, мастерские (workshop), а также научно-исследовательские лаборатории, по своей сути предназначены для жителей креативной пространственной единицы, потому потребность в них является периодической. Из этого следует, что перечисленные виды объектов и формы креативных пространств следует размещать максимально приближенно к жилым зонам, но раздельно друг от друга. В то же время арт-пространства / арт-кварталы с галереями, центры искусства, моды и дизайна предназначены в большей мере для посетителей креативной пространственной единицы, потому потребность в них является эпизодической. Отсюда указанные виды объектов и формы креативных пространств следует размещать концентрировано, но на определенном удалении от жилых зон. В отношении таких форм и объектов креативных пространств, как торговые улицы (retail street) и пространства креативного досуга, затруднительно однозначно определиться с выбором варианта их размещения. С одной стороны, потребности в той же торговой улице (retail street), скорее, периодические, чем эпизодические, но предназначена она в основном для посетителей креативной пространственной единицы. К тому же улица как линейно протяженный объект не может быть ни концентрированной, ни раздельной. Тогда следует рассматривать выбор вариантов между одной общей торговой улицей и несколькими специализированными исходя из направления креативной пространственной единицы. Что касается пространств креативного досуга, то часть их объектов, прежде всего связанная с дополнительным образованием (курсы кулинарии, кройки и шитья, рисования, дизайна и т.д.) и активной интеллектуальной деятельностью (всевозможные игры, квесты), обслуживает периодические потребности как жителей, так и посетителей креативной пространственной единицы. Ввиду возможного многообразия подобных курсов даже в рамках одной специализации креативной пространственной единицы указанные объекты целесообразно размещать раздельно, приближенно к жилой зоне. В то же время объекты проведения культурно-массовых и спортивных мероприятий обслуживают эпизодические потребности и рассчитаны в основном на посетителей пространственной единицы. Поэтому такие объекты целесообразно располагать концентрировано и отдаленно от жилой зоны (ввиду шума).

Для того чтобы вариант раздельного размещения объектов креативных пространств в рамках креативной пространственной единицы не привел к их разрозненности, необходимо добиться их связанности. С экономической точки зрения эта связанность достигается взаимным дополнением деятельности объектов, их направленностью на достижение общего для всех результата (увеличение объемов продаж

основной продукции и услуг согласно направленности креативной пространственной единицы). С архитектурной точки зрения связанность объектов между собой достигается соединяющими их коммуникациями и единым композиционным замыслом. С учетом современных градостроительных тенденций основным видом соединяющих объекты коммуникаций являются пешеходные улицы. Для креативной пространственной единицы на эту роль напрашивается торговая улица (retail street), сама по себе являющаяся одной из форм креативного пространства. Тогда все объекты и формы креативных пространств будут связаны между собой пешеходными торговыми коммуникациями, что позитивно скажется на их посещаемости и функционировании.

Далее рассмотрим возможные варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы с позиций коммуникационного аспекта гибкости, т.е. топологии, раскрываемой как «структура циркуляции, перемещения в пространстве» («топология связей») и «пространственная связанность объектов» [23, с.25, с.33]. С этих позиций нам видится четыре возможных варианта единого композиционного замысла (рис. 1).

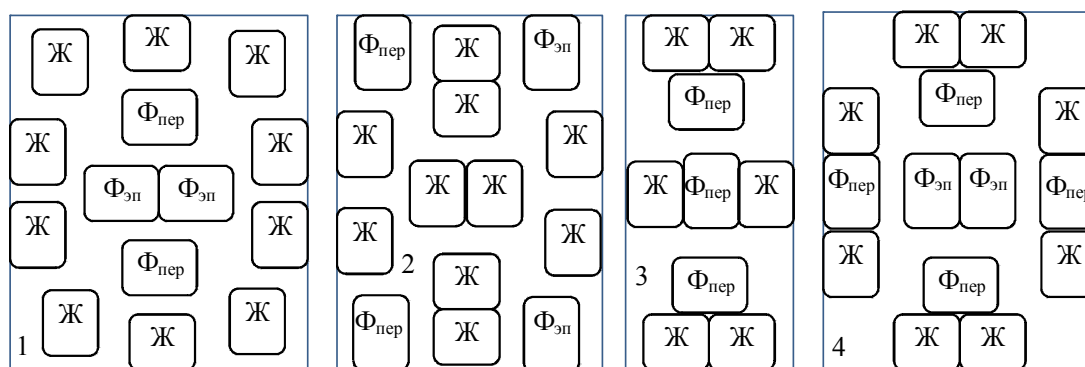


Рис. 1. Варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы
(разработано автором):

Ф_{пер}, Ф_{эп} – формы креативных индустрий, обслуживающих периодические и эпизодические потребности жителей; Ж – группы жилых зданий

Первый вариант предполагает размещение всех основных объектов в едином объеме (сооружении) в центре креативной пространственной единицы. Вокруг этого сооружения размещается зеленая зона (парк) с зонами отдыха, аттракционами, кафе, павильонами и т.д. На периферии размещается жилая зона с группами зданий, которая связана пешеходными дорожками или торговыми улочками с центральным сооружением, вмещающим объекты креативных индустрий. Данный вариант плохо подходит для объектов (loft, co-working, мастерские, научно-исследовательские лаборатории), которые удовлетворяют периодические потребности жителей креативной пространственной единицы и потому должны находиться в пределах жилой зоны. Такие объекты лучше вынести на границу двух зон – центральной и периферийной. Вторым вариантом, наоборот, предполагает вынесение двух-четырех сооружений с объектами креативных индустрий на периферию пространственной единицы и помещение в ее центр совмещенной жилой и зеленой зоны с парком развлечений. Все указанные элементы также соединяются пешеходными дорожками и торговыми улицами. Вышеуказанный недостаток первого варианта во втором сглажен лишь частично за счет распределения креативных объектов по нескольким сооружениям. Такие сооружения по-прежнему отделены от жилых зон, сохраняя некоторую отчужденность от них. Третий вариант предполагает раздельное размещение креативных объектов, каждый из которых органично встроен в свою часть жилой зоны, состоящей из дискретных групп зданий, равномерно распределенных по всей креативной пространственной единице и связанных между собой пешеходными торговыми коммуникациями. Здесь полностью устраняется вышеупомянутый недостаток первых двух вариантов, однако третий вариант не подходит для арт-пространств / кварталов с галереями, центров

искусства, моды и дизайна, т.е. объектов, удовлетворяющих эпизодические потребности посетителей креативной пространственной единицы.

И, наконец, четвертый вариант, вобравший в себя черты первых трех и потому являющийся компромиссом между ними, предполагает наличие как концентрации основных объектов, предназначенных для посетителей креативной пространственной единицы, в рамках двух-четырех крупных сооружений, так и отдельного размещения пространств, ориентированных на удовлетворение профессиональных потребностей самих жителей, в пределах жилой зоны. Общим для всех рассмотренных четырех вариантов является общий фон в виде зеленой зоны (парка), объекты креативных индустрий и группы жилых зданий, связанные пешеходными дорожками или торговыми улицами. Также обязательным является наличие объектов социальной инфраструктуры (школа, детский сад, поликлиника).

Далее необходимо выявить соответствие вариантов композиционного замысла, приведенного на рис. 1, направлениям развития креативной пространственной единицы, исходя из их сути. Так, для арт-пространств / арт-кварталов с галереями, центров искусства лучше всего подходит первый вариант с концентрацией в одном сооружении в центре креативной пространственной единицы. Второй вариант с рассредоточением основных объектов по трем-четырем сооружениям на периферии креативной пространственной единицы подходит для направления «экопоселение + агропереработка». Третий вариант с отдельным размещением креативных пространств в рамках отдельных частей жилой зоны лучше всего подходит для направлений «центр прототипирования и 3D-моделирования (Fab-Lab)» и «IT-центр». Четвертый, компромиссный, вариант является наиболее универсальным и подходит для целого ряда направлений: «центр моды и дизайна», «экопоселение + агропереработка» в случае включения объектов дополнительного образования (обучающих курсов), а также «центр прототипирования и 3D-моделирования (Fab-Lab)» и «IT-центр» при условии наличия демонстрационно-выставочных залов последних достижений этих индустрий.

Рассмотрим, насколько приведенные на рис.1 варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы соответствуют вариативному аспекту гибкости. Здесь гибкость подразумевает, что «одной и той же схеме связи элементов могут соответствовать разные варианты планировочного решения» [23, с.33]. Начнем с первого варианта. Расположение сооружения со всеми объектами креативной индустрии в центре, а жилой зоны с инфраструктурой на периферии является инвариантным планировочным решением и не дает никакой гибкости. Расположение ряда объектов креативных индустрий на периферии, а жилой зоны с инфраструктурой в центре пространственной единицы во втором варианте ее композиционного замысла позволяет получить разные планировочные решения за счет варьирования числа и расстановки сооружений. При этом число возможных вариантов невелико. Третий вариант с отдельным размещением креативных пространств в пределах жилой зоны дает гораздо большее число возможных планировочных решений при одной и той же схеме связи элементов. Так, связка «группа жилых зданий + креативное пространство» является самостоятельным модулем, и, варьируя их число, взаимное расположение, масштаб и конфигурацию самого модуля, можно получить большое разнообразие комбинаций, каждая из которых может стать отдельным архитектурно-планировочным решением. Например, взаимное расположение модулей и их соединение пешеходными дорожками может быть ортогональным, радиальным, зигзагообразным и т.п. Конфигурация модуля может быть замкнутой, Н(П)-образной, Y-подобной и т.д. Похожую вариативную гибкость демонстрирует и четвертый вариант композиционного замысла креативной пространственной единицы. С той разницей, что в данном случае модулем является связка из сооружения для размещения объектов креативных индустрий, а также другого модуля из предыдущего варианта композиционного решения. Варианты конфигурации модуля в четвертом варианте также отличаются от предыдущего: сооружение с объектами креативных индустрий может быть по центру, в окружении связок «группа жилых зданий + креативное пространство», либо располагаться по одну сторону от них, фокусируя на себе сходящиеся пешеходные

дорожки. Таким образом, максимальной вариативной гибкостью обладают третий и четвертый варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы, второй сильно им в этом уступает, а первый вариант вообще не имеет таковой.

Далее рассмотрим те же варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы с позиций третьего аспекта гибкости – адаптивного. Как правило, более адаптивными оказываются решения, имеющие четкую разбивку на этапы (на каждом из них, если нужно, можно вовремя остановиться). В принципе, в каждом из четырех вариантов композиционного замысла можно выделить отдельные этапы. Однако картина существенно меняется при учете требования сохранения целостности композиции.

Так, первый вариант композиционного замысла может быть реализован поэтапно при условии модульной конструкции сооружения для размещения креативных индустрий. Однако целостность отдельных этапов в данном случае является спорной, особенно при разбиении всей композиции на более чем две равные части. Действительно, весь композиционный замысел пространственной единицы в первом варианте представляет собой помещенное в центр сооружение с объектами креативных индустрий, окруженное группами жилых зданий и объектов социальной инфраструктуры (в рамках общей зеленой зоны). Оставление даже половины от этой целостности, не говоря уже о меньших частях, придает незавершенность сооружению с креативными предприятиями, а также оставляет часть периферии композиции без жилых зданий, как бы оголенной. Несколько скрасить подобную неприглядную картину может первичное формирование парковой зоны с площадью для проведения фестивалей, ярмарок, выставок и т.п. в центре композиции (тогда сооружение с объектами креативных индустрий вокруг открытой площадки в центре примет вид атриума).

Второй вариант композиционного замысла пространственной единицы позволяет рассматривать каждое из нескольких сооружений с объектами креативных индустрий на периферии и близлежащими группами жилых зданий в центре всей композиции как самостоятельное целое. Из этого следует лучшая приспособленность второго варианта композиционного замысла для его поэтапной реализации по сравнению с первым или, по-другому говоря, его большая адаптивная гибкость. Максимальную адаптивную гибкость демонстрирует третий вариант композиционного замысла, т.к. он включает в себя модули, состоящие из связки «креативное пространство – группа жилых зданий», каждый из которых является вполне законченной самостоятельной частной композицией. Несколько меньшую адаптивную гибкость имеет четвертый вариант композиционного замысла, т.к. он состоит из модулей, включающих в себя помимо вышеупомянутой связки еще и сооружение с объектами креативных индустрий, т.е. более сложных, чем в предыдущем случае. Это означает необходимость выделения более крупных этапов (модулей) в четвертом варианте композиционного замысла креативной пространственной единицы, чем в третьем.

Согласно [8, 17] единство и многообразие архитектурной композиции обеспечивается в т.ч. за счет стилизованных признаков, отражаемых в геометрии фасада, форме кровли зданий. Стилизованные признаки призваны фиксировать уникальный образ архитектурной композиции в привязке к направлениям креативной пространственной единицы. Как уже указывалось, для направлений «IT-центр» и «центр прототипирования и 3D-моделирования (Fab-Lab)» наиболее целесообразным будет архитектурный стиль минимализма (high-tech). Для направления «экопоселение + агропереработка» естественной будет «зеленая» или «бионическая» архитектура. Для направления «центр современного искусства» требуется авангардный дизайн, отражаемый параметрической (алгоритмической) архитектурой. По направлению «мода и дизайн» необходим свой индивидуальный стиль, не сводимый ни к одному существующему стилю («постмодерн», «ар-деко» и т.п.).

На основании вышеизложенного нами предложена система топологических характеристик креативных пространственных единиц, показанная на рис. 2.

Благодаря всестороннему охвату и отражению всех трех аспектов морфологии (материального, коммуникативного и художественного), использование предложенной нами системы топологических характеристик (см. рис. 2) позволит обеспечить широкое разнообразие архитектурного облика креативной пространственной единицы.

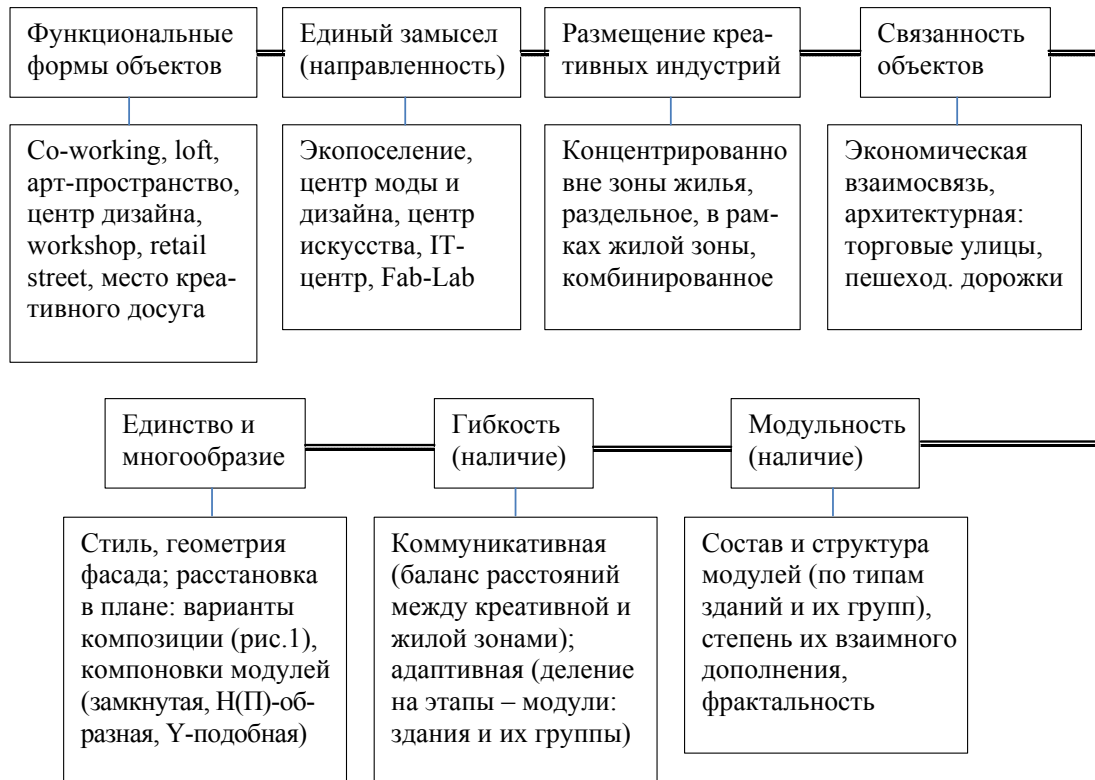


Рис. 2. Система топологических характеристик креативных пространственных единиц (разработано автором)

Заключение. Резюмируя вышесказанное, можно отметить следующее. С одной стороны, развитие творческих индустрий и создание креативных кластеров является востребованным инструментом развития территорий. С другой стороны, использование этого инструмента осложнено необходимостью создания соответствующей инфраструктуры и привлечения креативных специалистов в условиях их дефицита в регионах РФ. В свою очередь, это требует создания привлекательной архитектурной среды, свободной от таких распространенных недостатков, как монотонность, однообразие городской застройки.

Настоятельная потребность в возрастании «критической массы», заметности вклада творческих индустрий и кластеров в развитие территории, преодоление их слабой связанности друг с другом и другими предприятиями в регионе приводит к необходимости создания не отдельных пространств, а креативных пространственных единиц.

Основу креативной пространственной единицы должна составлять сформулированная единая стержневая идея, опирающаяся на креативные индустрии и кластеры, позволяющая заложить базис для самоидентификации творческих специалистов. В данной статье выделены возможные варианты отраслевой направленности, отражающие единую стержневую идею креативной пространственной единицы с точки зрения функционала. Это центр моды и дизайна, центр современного искусства, IT-центр, центр прототипирования и 3D-моделирования (Fab-Lab), экопоселение + агропереработка. Обосновано, что каждое направление должно иметь свой индивидуальный образ и единый архитектурный замысел.

Сформулированы общие концептуальные основы единого архитектурного замысла для каждого из отраслевых направлений креативной пространственной единицы. Для

направления «экопоселение + агропереработка» – это «зеленая / бионическая» архитектура. Для направления «Fab-Lab» – это крупноразмерные помещения в стиле «loft». Для направления «центр современного искусства» – это большепролетные сооружения с элементами параметрической (алгоритмической) архитектуры. Вместе с тем предложены оригинальные архитектурные замыслы, отражающие специфику указанных направлений. Так, для направления «IT-центр» обоснована целесообразность решения в виде группировки ячеек жилых блоков для IT-специалистов в замкнутых контурах, с высотными офисными зданиями фрактальной структуры в их центрах. Для направления «центр моды и дизайна» предложено решение в виде блокировки жилых секций (и выставочных площадей) разной этажности в замкнутую линию с образованием внутреннего пространства двора в плане и своеобразных «ступеней» по высоте. Для направления «центр современного искусства» предложено оригинальное решение жилых зданий в виде подобия пирамиды (пагоды / купола), состоящих из однотипных ячеек – квартир мансардного типа в 2-3 уровнях, сдвинутых относительно друг друга как по вертикали, так и по горизонтали, что формирует эстетически привлекательную фрактальную геометрию.

Обосновано, что учета вышеуказанных направлений недостаточно для обеспечения подлинного разнообразия, позволяющего достичь максимальной гибкости архитектурно-планировочных решений. В этих целях нами разработаны возможные варианты композиционного замысла креативной пространственной единицы (см. рис. 1). Эти варианты отражают различное взаимное расположение сооружений с объектами творческих индустрий, отдельных креативных пространств, а также групп жилых зданий. Проанализирована гибкость вариантов (см. рис. 1) с вариативной, коммуникативной и адаптивной позиций. Выявлено, что наибольшей гибкостью обладают третий и четвертый варианты композиционного замысла с размещением творческих индустрий в пределах жилой зоны (см. рис.1).

С учетом вышеизложенного нами сформирована система топологических характеристик креативных пространственных единиц (см. рис. 2); ее использование позволит обеспечить широкое разнообразие их архитектурного облика. Этот эффект может быть достигнут за счет сочетания таких характеристик, как функциональные формы объектов и единый замысел (направленность), размещение креативных индустрий и связанность объектов, модульность и гибкость, единство и многообразие, отражающих материальную сторону, коммуникативный и художественный аспекты архитектурной морфологии.

Список литературы

1. Суховская, Д.Н. Реализация творческого потенциала населения через креативные пространства города: лофты, зоны коворкинга, арт-территории / Д.Н. Суховская // Молодой ученый. – 2013. – № 10 (57). – С.650–652. – URL: <https://moluch.ru/archive/57/7762/> (дата обращения 04.07.2023)
2. Елисеева, Е.В. Роль креативных пространств в современной городской среде / Е.В. Елисеева // Вопросы науки и образования. – 2017. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-kreativnyh-prostranstv-v-sovremennoy-gorodskoy-srede/viewer> (дата обращения 04.07.2023)
3. Мацко, В.А. Креативность в системе досуговых концепций / В.А. Мацко // Вестник СПбГИК. – 2022. – №1 (50). – С.118–123.
4. Практическое руководство по созданию креативного кластера. // Агентство Стратегических Инициатив при Президенте РФ. – URL: <https://urban.space/main>
5. Родоман, Б.Б. География, районирование, картоиды: сборник трудов / Б.Б. Родоман. – Смоленск: Ойкумена, 2007. – 372с.
6. Бирюкова, Е.Е. Облик архитектурного пространства в контексте выразительного бытия архитектурного пространства / Е.Е. Бирюкова // Историческая и социально-образовательная мысль. – 2015. – Т.7, №6. – Ч.2. – С.156–158.

7. Монастырская, М.Е. Региональная градостроительная идентичность как основа «парадигмальной» интеграции в градообразовании / М.Е. Монастырская // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1 (30). – С.165–172.
8. Сомов, Г.Ю. Проблемы теории архитектурной формы / Г.Ю. Сомов, А.Г. Раппапорт // Форма в архитектуре: проблемы теории и методологии. – М.: Стройиздат, 1990. – С.164–335.
9. Красильников, В.Д. О минимализме в нашей архитектуре / В.Д. Красильников // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С.7–8.
10. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №4 (53). – С.170–175.
11. Некрасов, А.Б. Идентификация. Кухня архитектора. // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С.9–14.
12. Фролов, Д.П. Современные модели городского развития: от противопоставления к комбинированию / Д.П. Фролов, И.А. Соловьева // Пространственная экономика. – 2016. – №3. – С.151–171.
13. Волошинская, А.А. Концепции экокорода: рекомендации для России / А.А. Волошинская, В.М. Комаров // TERRA ECONOMICUS. – 2017. – Т. 15, №4. – С.92–108.
14. Романова, А.Ю. Особенности современных реализуемых проектов «городов будущего» / А.Ю. Романова // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С.65–78.
15. Федченко, И.Г. Современные закономерности формообразования жилых планировочных единиц / И.Г. Федченко // Academia. Архитектура и строительство. – 2019. – №4. – С.75–82.
16. Климов, Д.В. Принципы формирования гибридных пространств в условиях градостроительной регенерации территории города / Д.В. Климов, Э.Э. Красильникова // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С.85–89.
17. Иконников, А. Основы архитектурной композиции / А. Иконников, Г. Степанов. – М.: Искусство, 1971. – 225 с.
18. Козлов, Д.Ю. Непрерывность пространства и кинетическая форма в архитектуре / Д.Ю. Козлов. – URL: http://sectionseries.org/uploads/releases_PDF/001/ТИА1_Козлов.pdf
19. Крашенинников, А.В. Когнитивная урбанистика: архетипы и прототипы городской среды: монография / А.В. Крашенинников. – М.: КУРС, 2020. – 210 с.
20. Курбатов, Ю.И. Очерки по теории формообразования / Ю.И. Курбатов. – СПб.: СПб ГАСУ, 2015. – 132 с.
21. Гутнов, А. Мир архитектуры (Лицо города) / А. Гутнов, В. Глазычев. – М.: Молодая гвардия, 1990. – 358 с.
22. Кандилис, Ж. Стать архитектором / Ж. Кандилис. – М.: Стройиздат, 1979. – 272 с.
23. Шубенков, М.В. Структура архитектурного пространства: автореф. дис. ... доктора архитектуры / М.В. Шубенков. – М.: Московский архитектурный институт (МАРХИ). – 57 с.

References

1. Suhovskaya, D.N. Realization of creative potential of inhabitants through creative spaces of a city: loft, co-working zones, art territories / D.N. Suhovskaya // Young scientist. – 2013. – No.10 (57). – P.650–652. – URL: <https://moluch.ru/archive/57/7762/> (Date of application 04.07.2023)
2. Eliseeva, E.V. The role of creative spaces in the modern city environment / E.V. Eliseeva // The issues of science and education. – 2017. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-kreativnyh-prostranstv-v-sovremennoy-gorodskoy-srede/viewer> (Date of application 04.07.2023)

3. Matsko, V.A. Creativity in the system of spare time concepts / V.A. Matsko // Bulletin of Saint-Petersburg State Institute of Culture. – 2022. – No.1 (50). – P.118–123.
4. Practical guide for creating a creative cluster // Agency of Strategic Initiatives near President of Russia. – URL: <https://rurban.space/main>
5. Rodoman, B.B. Geography, zoning, cartoids: collection of papers / B.B. Rodoman. – Smolensk: Ecumenical, 2007. – 372 p.
6. Biriukova, E.E. Shape of an architectural space in the context of impressive being of an architectural space / E.E. Biriukova // Historical and socio-educational thought. – 2015. – Vol.7, no.6. – Part.2. – P.156–158.
7. Monastyrskaya, M.E. Regional urban identity as the basis for “paradigmatic” integration in urban development / M.E. Monastyrskaya // Regional architecture and engineering. – 2017. – No.1 (30). – P.165–172.
8. Somov, G.Yu. The problems of the theory of an architectural form/ G.Yu. Somov, A.G. Rappaport // Form in architecture: the problems of theory and methodology. – M.: Stroiizdat, 1990. – P.164–335.
9. Krasilnikov, V.D. About minimalism in our architecture / V.D. Krasilnikov // Academia. Architecture and construction. – 2015. – No1. – P.7–8.
10. Lapshina, E.G. The concept of an architectural space of cities: the dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022. – No.4 (53). – P.170–175.
11. Nekrasov, A.B. Identification. The kitchen of an architect / A.B. Nekrasov // Academia. Architecture and construction. – 2015. – No.1. – P.9–14.
12. Frolov, D.P. The modern models of urban development: from contrast to combining/ D.P. Frolov, I.A. Solovjeva // Spatial economics. – 2016. – No.3. – P.151–171.
13. Voloshinskaya, A.A. The concepts of eco-city: recommendations for Russia/ A.A. Voloshinskaya, V.M. Komarov // TERRA ECONOMICUS. – 2017. – Vol.15, no.4. – P.92–108.
14. Romanova, A.Yu. The specifics of the modern implementing projects of “future cities”/ A.Yu. Romanova // Academia. Architecture and construction. – 2015. – No.1. – P.65–78.
15. Fedchenko, I.G. The modern patterns of shaping residential planning units / I.G. Fedchenko // Academia. Architecture and construction. – 2019. – No.4. – P.75–82.
16. Klimov, D.V. The principles of forming hybrid spaces in conditions of urban development and regeneration of a territory of a city / D.V. Klimov, E.E. Krasilnikova // Academia. Architecture and construction. – 2016. – No.4. – P.85–89.
17. Ikonnokov, A. The basis of an architectural composition / A. Ikonnokov, G. Stepanov. – M.: Art, 1971. – 225 p.
18. Kozlov, D.Yu. Continuity of a space and the kinetic form in architecture / D.Yu. Kozlov. – URL: http://sectionaureseries.org/uploads/releases_PDF/001/ТИА1_Козлов.pdf
19. Krashennikov, A.V. The cognitive urbanism: archetypes and prototypes of an urban environment: monograph / A.V. Krashennikov. – M.: Course, 2020. – 210 p.
20. Kurbatov, Yu.I. Essays on the theory of shaping / Yu.I. Kurbatov. – Saint-Petersburg: State Architectural and Constructional University, 2015. 132 p.
21. Gutnov, A. The world of architecture (A face of a city) / A. Gutnov, V. Glazyichev. – M.: Young guard, 1990. – 358 p.
22. Candilis, G. To become an architect / G. Candilis. – M.: Stroiizdat, 1979. 272 p.
23. Shubenkov, M.V. The structure of an architectural space: Abstract of dis. ... doctor of architecture / M.V. Shubenkov. – M.: Moscow Architectural Institute (MARCHI). – 57 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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора
E-mail: ambereg@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

Beregovoy Aleksandr Marcovich,
Doctor of Sciences, Professor, Chief
Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В МАЛОЭТАЖНОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ ИЗ РАЗНОТИПНЫХ ЗДАНИЙ, ПОДКЛЮЧЕННЫХ К СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА

А.М. Береговой

Выполнен анализ факторов, воздействующих на энергоэффективность зданий в холодный и переходные периоды года. при дифференцированном распределении тепла в жилой застройке, состоящей из трех групп малоэтажных зданий энергоактивного и традиционного типов. Дана оценка энергосберегающему эффекту, который достигается в каждой из трех групп зданий с помощью разработанных технических решений, позволяющих использовать тепло солнечной радиации и верхних слоев земли.

В первой группе энергоактивных зданий энергосбережение повышается путем использования в периоды солнечной инсоляции известной конструкции наружного ограждения по типу «массивная стена» с лучепрозрачным экраном за счет теплоаккумулирующей способности конструкции, а также путем применения разработанной конструкции плоского солнечного коллектора. Во второй группе энергоактивных зданий эффект энергосбережения обеспечивается устройством вентилируемых воздуховодов в подземных помещениях, а также системой заглубленных тонкостенных бетонных каналов.

Повышение тепловой эффективности в традиционных зданиях третьей группы в период резкого похолодания может дать разработка алгоритма перераспределения тепла между зданиями, имеющими наружные ограждения разной тепловой инерции.

Ключевые слова: энергосбережение, малоэтажная жилая застройка, система автоматического регулирования тепла, тепло солнечной радиации, тепло верхних слоев земли, теплоаккумулирующая способность

ENERGY SAVING IN LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS OF DIFFERENT TYPES, CONNECTED TO AN AUTOMATIC HEAT CONTROL SYSTEM

A.M. Beregovoy

The analysis of the factors affecting the energy efficiency of buildings in cold and transitional periods of the year is carried out. taking into account the differentiated heat distribution in residential buildings, consisting of three groups of low-rise energy-active and traditional buildings. An assessment is given of the energy-saving effect, that is achieved in each of the three groups of buildings with the help of developed technical solutions, that allow using the heat of solar radiation and the upper layers of the earth.

In the first group of energy – active buildings, energy saving is increased by using during periods of solar insolation a well-known type of external enclosure structures «massive wall» with a translucent screen due to the heat storage capacity of the structure, as well as by applying the developed design of a flat solar collector. In the second group of energy-efficient buildings, the

energy-saving effect is provided by the placement of ventilated air ducts in underground rooms, as well as a system of underground thin-walled concrete channels.

An increase of thermal efficiency in traditional buildings of the third group during a cold snap can be achieved by developing an algorithm for redistributing heat between buildings with external enclosure structures of different thermal inertia,

Keywords: energy saving, low-rise residential buildings, automatic heat control system, solar radiation heat, heat of the upper earth layers, heat storage capacity

Жилые массивы, состоящие из домов, построенных в первый индустриальный период, и более современных зданий, отличаются большим разнообразием архитектурно-строительных решений. Такие здания имеют различную удельную теплозащитную характеристику и удельную величину тепловых потерь, на которые влияют нестационарные воздействия окружающей среды, циклический характер температурно-ветрового напора, интенсивность солнечной радиации, процессы нагрева-охлаждения наружных ограждающих конструкций.

В последнее время массивы жилых зданий начинают подключаться к системе автоматического регулирования тепла (АТ). В отличие от обычного способа теплоснабжения, который не обеспечивает дифференцированную подачу тепла разнотипным зданиям, система АТ имеет такие преимущества, как эффективное перераспределение тепловой энергии между зданиями, недопущение в них перетопа или дефицита тепла и формирование в помещениях более комфортных условий микроклимата.

Проблема рационального перераспределения тепла между зданиями актуальна не только в холодный, но и в переходные периоды года, поскольку под воздействием солнечной радиации разнотипные здания могут испытывать разную тепловую потребность в концентрированной тепловой энергии. В периоды резких похолоданий или при аварийном отключении системы центрального отопления охлаждение помещений в таких зданиях происходит с разной скоростью, особенно в тех из них, в которых основные конструкции имеют небольшие теплоаккумулирующую способность и тепловую инерцию. Это указывает на важность дифференцированного учета тепловой потребности зданий при наступлении упомянутых условий, а также на целесообразность расширения масштабов проектирования и строительства домов энергоактивного типа, приспособленных к использованию рассеянной энергии природной среды, что позволяет в таких случаях снижать темп охлаждения внутренней воздушной среды.

В настоящем исследовании дается приближенная оценка энергетического эффекта, возникающего во время эксплуатации таких зданий, подключенных к системе АТ, в условиях воздействия солнечной радиации в переходные периоды года, а также при наступлении резкого похолодания.

Выполненный анализ проектных решений энергоактивных зданий позволил установить, что при их создании особое внимание должно уделяться разработке архитектурно-конструктивных и планировочных решений, позволяющих активно поглощать, аккумулировать и передавать в помещения тепло возобновляемых источников энергии. Такой вид энергии целесообразно использовать в малоэтажных домах, в которых доля поступающего тепла от возобновляемых источников в объеме их тепловой нагрузки существенно больше по сравнению с многоэтажными зданиями.

Для повышения степени энергоактивности зданий используют специальные технические устройства или вносят изменения в конструктивное решение наружных ограждений, делая их более восприимчивыми к усвоению определенного вида возобновляемой энергии. Если строительство энергоактивных домов проводится в пределах давно эксплуатируемой застройки, то она будет состоять из разнотипных объектов, имеющих различные архитектурно-строительные решения.

Дома традиционного типа, расположенные в такой застройке, обычно плохо приспособлены к использованию рассеянной энергии природной среды. Основная часть тепла солнечной радиации, попадающей на наружные ограждения (до 90 %), отражается в атмосферу, а та незначительная часть теплового излучения, что проникает в здание через конструкции окон, сильно зависит от затененности фасада и

его ориентации по частям света. Тепло земляного массива, окружающего пространство подвала, практически не используется для подогрева жилых помещений.

Конструктивным особенностям энергоактивных ограждений и их теплоаккумулирующей способности посвящены работы [1–3]. Энергоэффективная конструкция со светопрозрачным экраном, теплоаккумулирующим слоем и системой трубопроводов для горячего водоснабжения представлена в [1]. Использование этой конструкции позволяет сократить потребление тепловой энергии в зависимости от климатических условий на 7–36 Гкал на каждые 100 м² ее поверхности. Влияние теплоаккумулирующей способности ограждений на экономическую эффективность их использования исследовано в [2]. Результаты изучения характера взаимодействия с солнечной радиацией наружных ограждений здания как геометрического тела рассмотрены в [3].

В настоящем исследовании оценка энергетического эффекта при перераспределении тепла между зданиями проводилась на примере малоэтажной жилой застройки, состоящей из следующих трех групп зданий. Первая группа – здания с наружными ограждениями по типу «массивная стена» и с энергоактивными элементами на стенах для восприятия тепла солнечной радиации. Вторая группа – здания с вентилируемыми заглубленными каналами и воздуховодами в подземных помещениях для восприятия тепла земляного массива. Третья группа – здания традиционного типа (рис. 1).

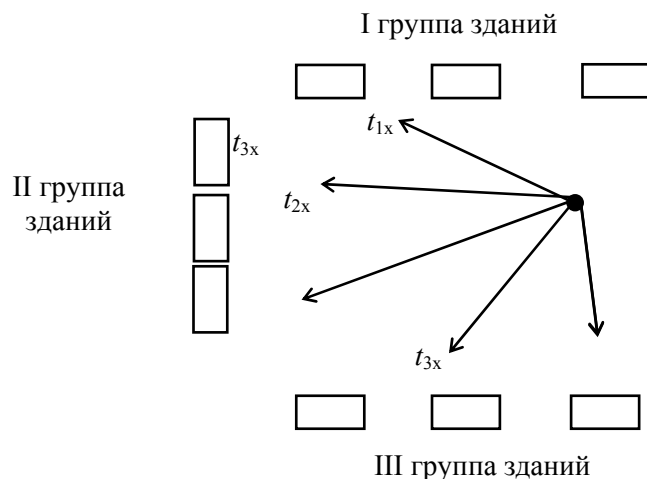


Рис. 1. Застройка из энергоактивных зданий (I и II группы) и зданий традиционного типа (III группа), оборудованных контрольными датчиками температур внутреннего воздуха в системе АТ (t_{1x} , t_{2x} , t_{3x})

В первой группе часть зданий имеет ограждения по типу «массивная стена» с лучепрозрачным экраном. Результаты ранее проведенного исследования показали, что теплоаккумулирующая способность Q_c такой конструкции и доля солнечного тепла в тепловой нагрузке здания могут быть достаточны для удовлетворения потребности помещений в отоплении [4]. В этом случае система АТ временно может отключить такие здания от отопления.

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot Q_s \cdot \Delta t / (\tau \cdot \alpha \cdot I \cdot R_o^{\text{экp}} - t_b) \cdot \lambda \cdot z, \quad (1)$$

$$Q_s = (t_n^y - t_b) k \cdot F \cdot z, \quad (2)$$

$$k = \lambda / \delta, \quad (3)$$

$$t_n^y = \tau \cdot \alpha \cdot I \cdot R_o^{\text{экp}}. \quad (4)$$

Здесь Q_s – величина теплового потока солнечной радиации; $R_o^{\text{экp}}$ – термическое сопротивление светопрозрачного экрана; t_n^y – условная температура наружного воздуха.

В наружных ограждениях другой части энергоактивных зданий этой группы использованы устройства для восприятия и передачи в помещения тепла солнечной радиации по типу плоского солнечного коллектора, разработанные и исследованные автором для определения доли тепла солнечной радиации от тепловой нагрузки малоэтажного здания в годовом цикле его эксплуатации [5]. Для оценки энергоэффективности этой конструкции в период кратковременного воздействия солнечной радиации была определена ее мощность по формуле

$$Q_s = W c \rho (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) / 3600, \quad (5)$$

где W – количество воздуха, поступающего из коллектора в помещение, $\text{м}^3/\text{ч}$; c – удельная теплоемкость воздуха, равная $1,005 \text{ Кдж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$; ρ – принятая в расчете плотность воздуха, равная $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$; $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – температура на входе и выходе из коллектора, $^\circ\text{C}$.

Натурные испытания коллектора, проведенные в межсезонье (октябрь и март), при плотности потока солнечной радиации $640 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в полуденное время показали следующие результаты: средние значения температур на входе внутреннего воздуха и выходе его из коллектора $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ равнялись соответственно 18 и $64,5 \text{ }^\circ\text{C}$ при скорости движения воздушного теплоносителя $0,38 \text{ м}/\text{с}$ и расходе воздуха в расчете на 1 м^2 коллектора $12 \text{ л}/\text{с}$, или $43,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Тогда максимальная мощность коллектора площадью 1 м^2 по формуле (5) будет равна $0,673 \text{ кВт}$. Так как на эффективное отопление 1 м^2 жилой площади, как известно, уходит в среднем 100 Вт , то тепловая потребность комнаты площадью 15 м^2 составит около $1,5 \text{ кВт}$. Таким образом, этот коллектор в полуденное время может передать в помещение количество тепла солнечной радиации, составляющее 45% от тепловой энергии, необходимой для его отопления.

Использование тепла земляного массива в малоэтажных зданиях второй группы осуществляется с помощью воздухопроводов или заглубленных каналов, устроенных в их подземных помещениях. Проведенное расчетное моделирование позволило определить температуру воздуха в сечении x воздухопровода или канала по формуле

$$t_x = t_c - (t_b - t_n) \cdot e^{-Ax}, \quad (6)$$

где t_c и A – величины, зависящие от ряда безразмерных показателей, определенных расчетным путем. Эффект экономии тепла возникает за счет поступающего объема подогретого земляным массивом воздуха, что позволяет уменьшить приток холодного вентиляционного воздуха в помещение через традиционное отверстие.

Натурный эксперимент по использованию тепла земли с помощью воздухопровода проводился при температурах наружного и внутреннего воздуха подвального помещения соответственно $-6 \text{ }^\circ\text{C}$, $+9 \text{ }^\circ\text{C}$, а также при скорости воздуха в воздуховоде $1 \text{ м}/\text{с}$. Длина последнего составляла 11 м , а сечение 11 см . По данным исследования, экономия тепловой энергии для жилых помещений с площадью от 11 до 60 м^2 находилась в пределах $11...48 \%$ [6].

В расчетной модели по использованию тепла земли с помощью вентилируемых заглубленных каналов, связанных с электрической системой воздушного отопления, были приняты следующие исходные данные: температуры наружного воздуха, подвального помещения, слоя земли равнялись соответственно $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, $+14 \text{ }^\circ\text{C}$, $+5 \text{ }^\circ\text{C}$, сечение тонкостенных бетонных каналов – $10 \times 25 \text{ см}$, а скорость воздуха в них – $1 \text{ м}/\text{с}$. Результаты расчета показали, что при температурах воздуха, выходящего из воздухораспределителя, от 20 до $45 \text{ }^\circ\text{C}$ доля тепла верхнего слоя земли в тепловой нагрузке этой системы отопления может составить от $39,5$ до $26,3 \%$ [5].

Экономия тепловой энергии при использовании системы АТ в третьей группе зданий наиболее заметна при наступлении низких температур за счет регулирования подачи тепла зданиям, имеющим разные массивность и теплоемкость конструкций, но одинаковое сопротивление теплопередаче наружных ограждений. Первый тип зданий этой группы имеет массивные стены из глиняного обыкновенного кирпича толщиной 64 см . Теплоемкость внутренних конструкций c_v , отнесенная к 1 м^3 здания, равна

230 кДж/(м³·°C). Во втором типе зданий стены малой массивности выполнены из трехслойных панелей толщиной 30 см с минераловатным утеплителем, а показатель c_v равен 180 кДж/(м³·°C). По данным Богословского В.Н., сдвиг во времени наступления максимальных теплопотерь через наружные ограждения n -го здания определяется по формуле

$$\Delta Z_n = 4Z_{p.n.}(0,113D_n - 0,017), \quad (7)$$

где D_n – тепловая инерция наружного ограждения n -го здания. При этом максимум теплопотерь жилой комнаты в здании второго типа с панельными стенами после резкого похолодания для климатических условий центральных регионов России может наступить при величине ΔZ_n , равной приблизительно 17 ч, а темп охлаждения помещения в здании первого типа будет в 1,5...2,2 раза меньше. Затраты тепловой энергии на отопление n -го здания в период резкого похолодания будут тем больше, чем меньше при прочих равных условиях величина D_n наружных ограждающих конструкций.

Оценку эффективности использования возобновляемых источников энергии при определении теплопоступлений в здания первой и второй групп можно дать с помощью следующего критерия:

$$K_{\text{эф.воз}} = (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}}) / (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}} + k_{\text{энс}} + k_{\text{тз}}). \quad (8)$$

Тогда формула расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания $Q_{\text{от}}^p$, Вт/(м³·°C), с учетом воздействия возобновляемых источников энергии, принимает вид

$$Q_{\text{от}}^p = k_{\text{об}} + k_{\text{вен}} - \beta_{\text{КПИ}} (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}} + k_{\text{энс}} + k_{\text{тз}}), \quad (9)$$

где $k_{\text{об}}$ – удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м³·°C); $k_{\text{вен}}$ – удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м³·°C); $k_{\text{быт}}$ – удельная характеристика внутренних теплопоступлений здания, Вт/(м³·°C); $k_{\text{рад}}$ – удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации, Вт/(м³·°C); $k_{\text{энс}}$ – удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации при использовании энергоактивных конструктивных решений, Вт/(м³·°C); $k_{\text{тз}}$ – удельная характеристика теплопоступлений в здание от окружающего земляного массива, Вт/(м³·°C); $\beta_{\text{КПИ}}$ – коэффициент полезного использования теплопоступлений.

Таким образом, при наличии автоматически регулируемой системы теплоснабжения появляется возможность более экономичного обеспечения тепловой энергией зданий в соответствии с их конструктивными особенностями и тепловой потребностью за счет внедрения исследованных энергоактивных устройств и перераспределения избытка тепловой энергии из одной группы зданий в другую, в которой испытывается ее дефицит.

Так, в периоды солнечной инсоляции такая система может временно отключить от отопления здания с конструкциями по типу «массивная стена» и лучепрозрачным экраном при условии, что теплоаккумулирующая способность этих ограждений и доля солнечного тепла в тепловой нагрузке здания достаточны для удовлетворения потребности помещений в отоплении. Применение на южных фасадах малоэтажных зданий разработанной конструкции плоского солнечного коллектора, максимальная мощность которого в межсезонье может достигать 0,673 кВт с 1 м² его площади, позволяет в полуденное время в условиях солнечной инсоляции передать в жилое помещение до 45 % тепла, необходимого для его эффективного отопления.

При использовании тепла земляного массива в малоэтажных зданиях обеспечивается следующая экономия тепловой энергии в жилых помещениях первого этажа:

- в межсезонье при наличии воздухопроводов в подвальных помещениях на величину 11...48 % (при площади комнат от 11 до 60 м²);
- при резком похолодании и наличии заглубленных каналов доля тепла верхнего слоя земли в тепловой нагрузке системы воздушного отопления помещения может

составить от 39,5 до 26,3 % (при температурах воздуха, выходящего из воздухораспределителя, от 20 до 45 °С).

Определенный энергетический эффект в период резкого похолодания может дать разработка алгоритма перераспределения тепла в автоматически регулируемой системе теплоснабжения между зданиями, имеющими наружные ограждения разной тепловой инерции с учетом, во-первых, сдвига во времени наступления максимальных теплопотерь через наружные ограждения, а во-вторых, темпа охлаждения помещения в случае отключения отопления n -го здания.

Список литературы

1. Шепс, Р.А. Тепловые потоки в пассивной многослойной солнечной панели / Р.А. Шепс, П.А. Головинский, Т.В. Щукина [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISIAEE). – 2018. – № 7–9. – С. 55–62.
2. Воротынцева, А.В. Экономическая эффективность применения ограждающих конструкций с теплоаккумулирующей способностью / А.В. Воротынцева, В.А. Болгов, Р.А. Шепс [и др.] // Экономика и предпринимательство. – 2018. – №7 (96). – С. 1236–1240.
3. Дусяров, А.С. Солнечная облученность зданий / А.С. Дусяров, Ш.К. Яхшибоев, О.Н. Бегимов // Молодой ученый. – 2017. – № 8 (142). – С. 50–52.
4. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующие свойства энергоактивной стены в системе естественной вентиляции и отопления здания / А.М. Береговой, В.А. Береговой, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С. 74–77.
5. Береговой, А.М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, В.А. Береговой. – 3-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 200 с.
6. Береговой, А.М. Использование тепла подземных помещений в энергосбережении / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85–89.

References

1. Sheps, R.A. Heat flows in a passive multilayer solar panel / R.A. Sheps, P.A. Golovinsky, T.V. Shchukina [etc.] // International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology» (ISIAEE). – 2018. – №. 7–9. – P. 55–62.
2. Vorotyntseva, A.V. Economic efficiency of the use of enclosing structures with heat storage capacity / A.V. Vorotyntseva, V.A. Bolgov, R.A. Sheps [etc.] // Economics and entrepreneurship. – 2018. – №7 (96). – P. 1236–1240.
3. Dusyarov, A.S. Solar irradiation of buildings / A.S. Dusyarov, Sh. K. Yakhshiboev, O. N. Begimov // Young Scientist. – 2017. – № 8 (142). – P. 50–52.
4. Beregovoy, A.M. Heat storage properties of an energy-active wall in the natural ventilation and heating system of a building. Beregovoi, V.A. Beregovoy, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2017. – №1. – P. 74–77.
5. Beregovoy, A.M. Energy-efficient and energy active buildings in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.V. Grechishkin, V.A. Beregovoy. – 3-e edition., revised and enlarged. – Penza: State University of Architecture and Construction, 2012. – 200 p.
6. Beregovoy, A.M. Using of underground rooms heat in energy saving / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, B.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2016. – No.1. – P. 85–89.

УДК 725.1

DOI 10.54734/20722958_2024_2_215

*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

Шамина Маргарита Павловна,
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 Alecsandrovna,
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

Shamina Margarita Pavlovna,
Master student
E-mail: gsia@pguas.ru

ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА УЧРЕЖДЕНИЙ ДОШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ 1960-80-Х ГОДОВ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.П. Шамина

Представлены результаты системного анализа методом натурного обследования особенностей объемно-планировочной структуры и технического состояния объектов дошкольных образовательных учреждений, построенных в советский период и требующих капитального ремонта. Определены основные типы дошкольных образовательных учреждений 1960-80-х годов постройки и установлены причины их несоответствия требованиям современных нормативно-правовых актов. Определен и систематизирован перечень вопросов, требующих решения при капитальном ремонте указанных объектов. Предложены функционально-планировочные схемы для создания полноценных условий пребывания в дошкольных учреждениях при условии выполнения капитального ремонта. Сделаны выводы о целесообразности капитального ремонта зданий дошкольных образовательных учреждений и приведены концептуальные предложения по их архитектурно-пространственному решению.

Ключевые слова: капитальный ремонт, дошкольные образовательные учреждения, объемно-планировочная структура, функционально-планировочная схема, материально-техническая база, техническое обследование, строительные конструкции, инженерные сети

GENERAL PLANNING STRUCTURE OF PRESCHOOL EDUCATIONAL INSTITUTIONS BUILT IN THE 1960S AND 80S

M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.P. Shamina

A systematic analysis of the features of spatial planning structure and technical condition of preschool educational institutions built during the Soviet period and requiring major repairs by the method of a full-scale survey is carried out. The main types of preschool educational institutions built in the 1960s-80s and the reasons they don't meet the requirements of modern regulatory legal acts are established. A list of issues that should be solved before major repairs has been identified and systematized. Functional and planning schemes are proposed to create full-fledged conditions in preschool institutions during major repairs. Conclusions are drawn about the expediency of using the method of capital repairs of buildings of preschool educational institutions and conceptual proposals for their architectural and spatial solution.

Keywords: major repairs, preschool educational institutions, spatial planning structure, functional planning scheme, material and technical base, technical inspection, building structures, engineering networks

Один из показателей, характеризующих современное градостроительство, – повышенная потребность в дошкольных образовательных учреждениях (ДОУ). При этом в разных районах города сеть детских садов имеет неравномерную нагрузку, чем обусловлены особенности размещения детей в ДОУ. Районам, имеющим благоприятные условия для проживания, работы и досуга, свойственно интенсивное развитие. И наоборот, существуют районы, характеризующиеся регрессом. Вместе с тем в 90-е годы прошлого века значительная часть детских садов была приватизирована или перепрофилирована. С обновлением нормативных документов, регламентов по эксплуатации зданий допустимая вместимость детских садов уменьшилась. Поэтому вместе со строительством новых зданий ДОУ целесообразным может стать преобразование уже существующих объектов советского периода (1960–80-е годы), находящихся в неудовлетворительном техническом состоянии, методом капитального ремонта или реконструкции (рис. 1).

Материалом исследования стали статистические данные по учреждениям дошкольного образования, которые можно привести в нормативное состояние после выполнения капитального ремонта (см. таблицу).

Федеральный округ РФ	Число зданий дошкольных образовательных организаций, требующих капитального ремонта				
	2019	2020	2021	2022	2023
Дальневосточный федеральный округ	237	258	439	413	449
Приволжский федеральный округ	1051	927	831	736	623
Северо-Западный федеральный округ	113	86	103	59	73
Северо-Кавказский федеральный округ	584	655	546	591	584
Сибирский федеральный округ	498	477	295	246	267
Уральский федеральный округ	135	153	139	124	109
Центральный федеральный округ	407	357	394	358	363
Южный федеральный округ	365	254	207	214	198



Рис. 1. Существующие здания ДОУ, построенные в 1960–80-е годы

Целью исследования был анализ особенностей объемно-планировочной структуры и технического состояния объектов ДОУ, построенных в советский период и эксплуатируемых в настоящее время по назначению.

Метод натурного обследования типовой квартальной жилой застройки был применен при изучении несоответствия расположенных в ней зданий дошкольных учреждений основным критериям: функционально-планировочным, техническим и социально-демографическим.

Метод системного анализа, используемый при исследовании, позволил определить функционально-планировочную структуру ДОУ 1960–80-х годов, обеспечивающую потребности этого периода (рис. 2).

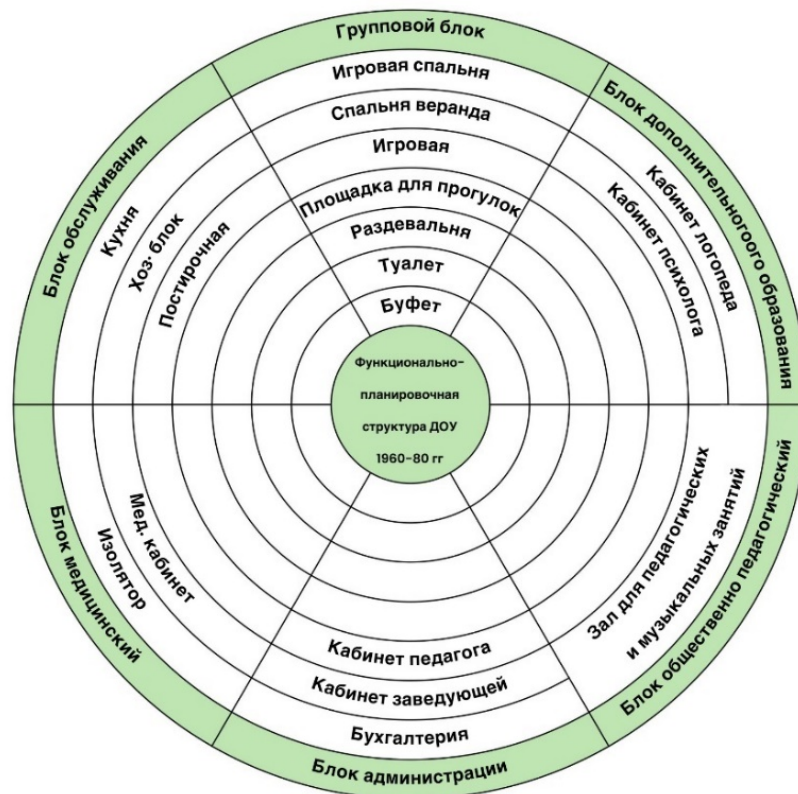


Рис. 2. Функционально-планировочная структура ДОУ 1960–80-х годов

Основными причинами несоответствия требованиям современных нормативно-правовых актов большей части муниципальных дошкольных образовательных учреждений, построенных в период Советского Союза, являются:

- проблема обеспеченности и доступности этих ДОУ;
- неудовлетворительное состояние материально-технической базы муниципальных ДОУ;
- несоответствие ДОУ современным требованиям противопожарных и санитарно-эпидемиологических норм;
- недостаточная возможность трансформации функционально-пространственной структуры.

В процессе анализа проектной документации и существующих зданий ДОУ выявлены основные типы детских дошкольных учреждений, построенных в рассматриваемый период (рис. 3). Во всех рассмотренных вариантах входные группы не соответствуют требованиям для маломобильных групп населения, т.к. эти нормы на тот момент попросту отсутствовали. Поэтому в ходе капитального ремонта целесообразна адаптация входов в здание ДОУ согласно СП 138.13330.2012.

Установлено, что противопожарные мероприятия в рассмотренных зданиях детских садов обеспечены не в полной мере: отсутствуют противодымная защита, зоны безопасности, дополнительные выходы, наружные противопожарные лестницы, подъездные пути и противопожарные проезды. Выполнение капитального ремонта позволит устранить несоответствие СП 1.13330.2009.

В процессе анализа определено, что материально-техническая оснащенность ДОУ взаимосвязана с объемно-планировочным решением зданий и благоустройством территорий, на которых располагается детский сад. Составляющий элемент материально-технической базы ДОУ – техническое состояние зданий, позволившее объективно оценить работоспособность строительных конструкций.

Тип	Схема	Типовой проект	Вместимость	Схема групповой ячейки	Функциональная модель ДОО
Средний тип	Ячеинковая	2МГ-043	12 групп		
Крупный тип	Ячеинковая	VI-13	12 групп		
Средний тип	Павильонная	VI-44	10 групп		
Малый тип	Павильонная	VI-49	6 групп		
Крупный тип	Павильонная	VI-52 п.3	12 групп		
Средний тип	Павильонная	VI-52 п.2	10 групп		

● Групповой блок

● Общий зал д/занятий

● Горизонтальное коммуникационное пространство

● Вертикальное коммуникационное пространство

● Социально-бытовые помещения

Рис. 3. Основные типы ДОО периода постройки 1960–80-х годов

В результате выполненной работы был определен и систематизирован перечень вопросов, требующих решения при капитальном ремонте:

- отсутствие необходимой проектно-сметной документации на здания, предполагаемые к капитальному ремонту;
- аварийное состояние внешних и внутренних инженерных сетей (рис. 4);
- несоответствие глубины заложения фундаментов гидрогеологическим условиям;
- отсутствие гидроизоляции стен и фундаментов;
- несовершенство и повреждения кровельного покрытия, накрывных устройств (рис. 5);
- разрушение или отсутствие отмостки вокруг здания (рис. 6);
- наличие процессов, способствующих полному или частичному замачиванию конструктивных элементов (рис. 7, 8);
- недостаточное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций (рис. 9);
- отсутствие (при необходимости) в уровне перекрытий монолитных поясов;
- многочисленные деформации несущих конструктивных элементов – стен, балок, колонн, плит перекрытий (рис. 10);

- наличие локальных трещин в стенах, выпадение и выкрашивание стеновых материалов (рис. 11);
- несоответствие прочности стеновых материалов требованиям современных норм (рис. 11).



Рис. 4. При техническом обследовании инженерных систем здания детского сада выявлено: выпуски бытовой канализации выполнены из чугунных труб, трубопроводы имеют разрушения; сеть бытовой канализации имеет механические повреждения; внутренние сети отопления и вентиляции требуют замены



Рис. 5. На крыше здания детского сада водоприемные и вентиляционные устройства не соответствуют современным требованиям, кровельный материал имеет многочисленные повреждения



Рис. 6. Отмостка здания детского сада имеет многочисленные следы разрушений



Рис. 7. Множественные следы намокания и разрушения поверхностного слоя стен



Рис. 8. В здании детского сада трещины в многопустотных конструкциях перекрытия, коррозия рабочих стержней и арматурных изделий



Рис. 9. Стены здания детского сада не соответствуют современным теплотехническим требованиям



Рис. 10. В здании детского сада имеются локальные трещинообразования в несущих стенах, коррозия арматурных изделий, разрушение перемычек



Рис. 11. В здании детского сада разрушение защитного слоя бетона колонны и коррозия арматурных рабочих стержней

Однако вышеперечисленные проблемы не являются причиной для принятия решения о смене функционального назначения существующего здания ДООУ, т.к. решаются в ходе капитального ремонта.

После проведенных исследований, систематизации полученных результатов было принято, что полноценные условия в ДООУ при выполнении капитального ремонта могут быть сформированы при создании функционально-планировочных схем, созданных:

- объединением укрупненных модулей вокруг функциональных зон;
- выделением пространств для занятий с рассредоточенным размещением помещений для обслуживания;
- расширением учебных помещений;
- иерархическим расположением помещений, плотно расположенных друг к другу.

Предлагаемые схемы отвечают действующим требованиям учебно-воспитательного процесса.

В связи с актуальностью темы преобразования ДООУ в ходе капитального ремонта сделаны концептуальные предложения по их архитектурно-пространственному решению (рис. 12, 13).



Рис. 12. Концептуальные предложения по преобразованию зданий ДОУ в ходе капитального ремонта



Рис. 13. Концептуальные предложения по архитектурно-планировочному решению зданий ДОУ

Выполнение капитального ремонта зданий детских дошкольных учреждений постройки 1960–80-х гг. позволит обновить архитектурно-планировочные и конструктивные решения, пересмотреть состав помещений и реализовать рациональную организацию площадей в соответствии с разными видами учебно-воспитательного процесса.

Выводы:

1. Капитальный ремонт ДОУ в действующих зданиях, расположенных в сложившихся кварталах городской застройки, позволит сохранить основные потоки из близлежащих жилых домов и остановок общественного транспорта, что исключит миграцию детей в удаленные районы.

2. Принимая метод капитального ремонта в унифицированной структуре ДОУ, появляется возможность применения в воспитательном процессе прогрессивных методик.

3. При выборе варианта капитального ремонта существующего здания ДОУ в сравнении с новым строительством сохраняется его размещение в наиболее выгодном озелененном месте жилого образования, удаленном от шума магистралей.

Список литературы

1. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1. – С.75–79.
2. Дерина, М.А. Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2. – С.75–79.
3. Дерина, М.А. Оценка и расчет проектных решений зданий с использованием системы технико-экономических показателей / М.А. Дерина, Г.А. Семина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – №1(32). – С.75–79.
4. Золотник, С.В. Анализ объемно-пространственной структуры зданий дошкольных образовательных учреждений, построенных по типовым проектам 60-80-х годов 20 века / С.В. Золотник // Фундаментальные исследования. – 2016. – №11-1. – С.37–41.
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. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.
7. Петрянина, Л.Н. Методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции жилых районов / Л.Н. Петрянина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1–2(35).
8. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.
9. Петрянина, Л.Н. Система экологического менеджмента в проектной организации / Л.Н. Петрянина, А.А. Булдыгина, О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С.164.
10. Петрянина, Л.Н. Проблемы теплозащиты зданий / Л.Н. Петрянина, Э.В. Санян, М.А. Дерина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №6(13). – С. 179–187.
11. Абрамян, С.Г. Реконструкция зданий и сооружений: основные проблемы и направления / С.Г. Абрамян // Инженерный вестник Дона. – 2016. – №4. – С.1–9.
12. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С. 83–86.

References

1. Derina, M.A. Comparative analysis of technical and economic indicators of design solutions for residential and public buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Chupryakov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P.75–79.
2. Derina, M.A. Architectural and construction design: problems of quality assessment / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P.75–79.
3. Derina, M.A. Assessment and calculation of design solutions for buildings using a system of technical and economic indicators / M.A. Derina, G.A. Semina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2021. – No. 1(32). – P.75–79.

4. Zolotnik, S.V. Analysis of the spatial structure of buildings of preschool educational institutions built according to standard designs of the 60-80s of the 20th century / S.V. Zolotnik // *Fundamental research*. – 2016. – No.11-1. – P.37–41.
5. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Y.S. Sergunina // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – No. 1(42). – P.212–217.
6. Petryanina, L.N. Concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – No.1(38). – P.203–208.
7. Petryanina, L.N. Methodology for improving the efficiency of urban areas in the reconstruction of residential areas / L.N. Petryanina, A.V. Grechishkin // *Architecture and engineering*. – 2018. – No.1–2(35).
8. Petryanina, L.N. On the issue of integrated urban planning / L.N. Petryanina // *Bulletin of the Belgorod Technological University named after V.G. Shukhov*. – 2018. – No.7. – P.57–64.
9. Petryanina, L.N. Environmental management system in a project organization / L.N. Petryanina, A.A. Buldygina, O.V. Karpova // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 4. – P.164.
10. Petryanina, L.N. Problems of thermal protection of buildings / L.N. Petryanina, E.V. Sanyan, M.A. Derina // *Education and science in the modern world. Innovation*. – 2017. – No.6(13). – P. 179–187.
11. Abrahamyan, S.G. Reconstruction of buildings and structures: the main problems and directions / S.G. Abrahamyan // *Bulletin of the Don*. – 2016. – No.4. – P.1–9.
12. Petryanina, L.N. Reconstruction of the urban environment: new and established buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastyrev // *Regional Architecture and engineering*. – 2016. – No.4. – P. 83–86.