

На правах рукописи



Суздальцев Олег Владимирович

**ДОЛГОВЕЧНЫЕ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫЕ
ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ КАМНЕДРОБЛЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

- Научный руководитель – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор **Калашников Владимир Иванович**
- Официальные оппоненты – **Хозин Вадим Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций»
- **Бузулуков Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», профессор кафедры «Физическая химия»
- Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 2 июля 2015 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корп. 1, конференц-зал.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01>.

Автореферат разослан 30 апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы

Самоуплотняющийся архитектурно-декоративный бетон заслуженно называют новейшим отделочным материалом. Он вытесняет отделочную керамику в связи с возможностью изготовления на его основе большеразмерных декоративных изделий не только плоской, но и разнообразной изогнутой формы (3D-бетон) с плавным сопряжением поверхностей. Такой бетон наилучшим образом интегрируется в органичную архитектуру, великолепно вписывается в любой дизайн, включая экстравагантный футуристический. Из декоративных бетонов, в том числе высокопрочных, создаются новые архитектурные контексты в зданиях и сооружениях с высокохудожественным оформлением и неповторимым своеобразием. Все это определяет практическое применение самоуплотняющихся (СУБ) декоративных бетонов как искусство. Подобная «революция» в производстве бетона и изделий из него предоставляет дизайнерам, архитекторам и проектировщикам безграничные возможности при оформлении фасадов и устройстве элементов наружной и внутренней отделки, а также при создании ландшафтного дизайна как на придомовых территориях, так и в общественных местах (скверах, парках и т.д.).

Одной из основных задач, требующих решения при разработке составов архитектурных бетонов, является снижение пористости и водопоглощения и, как следствие, повышение прочности и морозостойкости, что особенно актуально для основных климатических широт России с значительным диапазоном знакопеременных температур. В нашей стране практически отсутствуют исследования, посвященные вопросам применения, с одной стороны, высокопрочных, с другой стороны, порошково-активированных мелкозернистых (песчаных) бетонов нового поколения в качестве архитектурно-отделочных и декоративных материалов. Для создания их наиболее приемлемы отсева камнедробления горных пород фр. 0-5 мм с различной цветовой гаммой.

Кроме того, использование многотоннажных отходов камнедробления в качестве основных компонентов для производства архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов значительно расширяет сырьевую базу для производства бетонов нового поколения и существенно снижает нагрузку на экосистему регионов с горнодобывающими и горнообогачительными предприятиями.

В связи с этим разработка самоуплотняющихся долговечных архитектурно-декоративных бетонов с использованием отходов камнедробления с микрометрическим и миллиметрическим диапазоном дисперсности и зернистости, без применения дорогостоящего дефицитного микрокремнезема, без нанотехнологий является чрезвычайно актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнялась в рамках стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013-2015 годы (СП-4621.2013.1).

Степень разработанности избранной темы

Огромную роль в изучение и реализацию высокопрочных бетонов из жесткоуплотняемых бетонных смесей в отечественной практике внесли разработки И.Н. Ахвердова, Ш.Т. Бабаева, В.В. Бабкова, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, В.С. Демьяновой, Н.Н. Долгополова, В.В. Михайлова, Г.В. Несветаева, И.Н. Рыжова, Н.В. Свиридова и др.

В передовых зарубежных странах вопросами создания самоуплотняющихся бетонов начали заниматься в 1990-1995 гг., но они касались разработок получения и реализации реакционно-порошковых самоуплотняющихся бетонов; эти работы связаны с исследованиями таких ученых, как Aitchin P, Cheurezy M, Colepardi M, De Larrard, Edward G, Mechtherine V, Richard P, Santhosh P.T. и др. Работы некоторых ученых из этого перечня содержат фундаментальные основы создания сверхвысокопрочного порошкового цементного композиционного материала при существенном снижении микрогетерогенности и образовании прочных химических связей на границе раздела микрометрических и нанометрических частиц наполнителей с продуктами гидратации цементного камня. В отечественной практике разработки в области получения самоуплотняющихся бетонов, которые за рубежом называют «шагом в будущее», с осадкой бетонной смеси из стандартного конуса 25-28 см, получили развитие с 1995-2000 гг. и были связаны с исследованиями В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Н.И. Карпенко, В.Р. Фаликмана, В.Г. Хозина, А.В. Шейнфельда и др. До этого времени проблема получения самоуплотняющихся бетонов не рассматривалась, ибо их нельзя было получить по старой рецептуре «цемент – песок – щебень – вода» с суперпластификаторами любого типа.

Основные принципы получения высокопрочных и сверхпрочных самоуплотняющихся бетонов нового поколения в отечественной практике впервые сформулировал д.т.н., профессор В.И. Калашников. Позже появился ряд работ его последователей и учеников, направленных на исследование высокопрочных и особовысокопрочных бетонов, в которых подробно дана классификация современных бетонов нового поколения и сформулированы основные принципы создания таких бетонов.

Однако фундаментальных работ и диссертационных исследований в области создания высокопрочных и сверхпрочных архитектурно-декоративных самоуплотняющихся бетонов без использования микрокремнезема и ВНВ в отечественной практике не было.

Цели и задачи диссертационного исследования

Целью исследования является разработка составов самоуплотняющихся порошково-активированных тонкозернистых (песчаных) бетонных смесей, в том числе цветных, для производства высокоплотных, высокопрочных и долговечных архитектурно-декоративных бетонов, не теряющих своей архитектурной привлекательности в течение длительной эксплуатации, на основе многотоннажных отходов камнедробления различных горных пород, без использования дорогостоящих минеральных реакционно-активных компонентов и исследование их физико-технических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- выявить критерии выбора цемента, реологически-активных тонкодисперсных наполнителей микрометрического уровня дисперсности и нанодисперсных пигментов для использования их в порошково-активированных бетонах нового поколения;

- изучить реотехнологические свойства цементных суспензий и суспензий с дисперсными наполнителями и нанодисперсными пигментами с различными суперпластификаторами в бинарных и тройных композициях;

- классифицировать наиболее эффективные способы формирования декоративной поверхности архитектурно-декоративных бетонов;

- изучить влияние структурной объемной порошковой и поверхностно-пропиточной гидрофобизации на реотехнологические свойства пластифицированных суспензий, физико-механические и гигрометрические показатели порошково-активированных тонкозернистых песчаных бетонов. Изучить возможность сохранения в бетоне в свободном виде фотокатализатора TiO_2 ;

- исследовать влияние отбеливающих и окрашивающих компонентов на реотехнологические, гигрометрические и физико-механические свойства порошково-активированных бетонов;

- разработать составы архитектурно-декоративных порошково-активированных самоуплотняющихся мелкозернистых (песчаных) бетонов по микротехнологиям, т.е. без использования специальных реакционно-активных нанометрических добавок (микрокремнезема, белой сажи и т.д.), с высокой прочностью и морозостойкостью, в том числе с пониженным расходом цемента, на основе отходов камнедробления различных горных пород в качестве микрометрических и миллиметрических наполнителей и заполнителей;

- исследовать основные физико-механические и гигрометрические свойства архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов;

- обосновать технико-экономическую эффективность внедрения архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на основе отходов камнедробления и предложить технологическую схему их производства.

Научная новизна работы

- выявлены реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты индивидуальных минеральных, бинарных и тройных суспензий как реологической основы самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонов. Установлено, что для получения высоких значений прочности, плотности, морозостойкости, чрезвычайно малого водопоглощения и низких усадочных деформаций бетонов объемное содержание высококонцентрированной, агрегативно-устойчивой воднодисперсно-тонкозернистой суспензии в бетонных смесях для высокопрочных бетонов с прочностью $140 \div 160$ МПа должно находиться в диапазоне не менее $80 \div 85$ %;

- впервые систематизированы классификационные критерии формирования поверхности архитектурно-декоративных суспензионных СУБ;

- выявлены кинетические закономерности ускоренного твердения высокопрочных архитектурно-декоративных бетонов с дисперсными наполнителями из отходов камнедробления горных пород. Установлено формирование чрезвы-

чайно высокой односуточной и семисуточной прочности, достигающей соответственно 55÷60 % (55÷85 МПа) и 82÷87 % (100÷120 МПа) от нормированной 28 суточной ($R_{сж}=110\div140$ МПа), в бетонах без специальных добавок, не имеющей аналогов ни в зарубежной, ни в отечественной производственной и научно-исследовательской практике;

- выявлено позитивное влияние диоксида титана на повышение прочности порошково-активированных песчаных бетонов (до 7÷9 %). Для обоснования «зеленых технологий» от введения фотокаталитического TiO_2 , экологически облагораживающего загрязненный воздух, методом рентгенофазового анализа установлено формирование новой структурообразующей фазы в системе « TiO_2 - $Ca(OH)_2$ » при жесткой гидротермальной обработке (давление водяного пара 1,2 МПа, температура 191°C). Выявлено сохранение в структуре бетона фотокаталитического диоксида титана в свободном виде в количестве, достаточном для экологизации загрязненного воздуха городских улиц, проспектов и т.д.;

- впервые разработаны высокоплотные архитектурно-декоративные порошково-активированные песчаные высокопрочные самоуплотняющиеся бетоны с прочностью 110÷140 МПа и более без использования реакционно-активного микрокремнезема. Установлено, что сверхвысокопрочные бетоны с прочностью на сжатие 160 МПа и водопоглощением, не превышающим 1 % по массе, выдерживают более 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания без потери прочности и массы, что определяет на современном этапе приоритеты микротехнологий над нанотехнологиями бетонов и стратегию производства бетонов в будущем по микронанотехнологиям.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в использовании фундаментальных научных положений физико-химии стабилизированных агрегативно-устойчивых водно-дисперсных систем в приложении к особому классу пластифицированных суспензий, в которых дисперсной фазой выступают гидратирующие микрометрические частицы цемента и индеферентные к воде микрометрические частицы минеральных наполнителей и нанометрические частицы пигмента. Показано, что совокупность разнородных по минералогическому составу, заряду и потенциалу поверхности частиц, образующих с водой малоструктурированные предельно-разжиженные суперпластификаторами (СП) суспензии, является реологической основой самоуплотняющихся бетонных смесей для получения высокоплотных высокопрочных бетонов.

Практическая значимость обусловлена тем, что:

- получены архитектурно-декоративные порошково-активированные песчаные самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с расходами цемента 400÷730 кг/м³ с прочностью на сжатие 100÷160 МПа с удельным расходом цемента на единицу прочности 3,6÷5,5 кг/МПа. Это не исключает возможности применения таких бетонов не только в качестве архитектурно-декоративных, но и в качестве конструкционных, как высокопрочной матрицы для дисперсного или стержневого армирования. Техническая, экономическая и экологическая эффективность исследования состоит в том, что в качестве основных сырьевых компонентов – наполнителей и заполнителей микрометрического и миллимет-

рического размерных уровней – рекомендуется использовать, наряду с природными песками, отсева камнедробления различных горных пород фр. 0÷5 мм, в первую очередь широко распространенных реологически-активных дисперсных известняков, которые составляют колоссальный резерв сырьевой базы для производства высокофункциональных бетонов в регионах с известняковыми горными выработками;

- разработаны составы порошково-активированных бетонов и предложены способы формирования декоративной поверхности, позволяющие получить архитектурно-декоративные бетоны с фактурой поверхности, имитирующей фактуру натуральных горных пород;

- разработаны цветные порошково-активированные песчаные бетоны с высокими физико-механическими и гигрометрическими показателями, в частности с морозостойкостью более 1000 циклов, что гарантирует высокую долговечность их без потери прочностных и эстетических характеристик;

- разработана технологическая схема производства окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов;

- рассчитан экономический эффект при значительном сокращении расхода цемента и частичной замене его каменной мукой, а также существенном увеличении доли песка-заполнителя фр. 0,63÷2,5 мм. Результаты диссертационной работы получили внедрение в ООО «Инновационные технологии» (г. Пенза).

Методология и методы диссертационного исследования

Методология исследования диссертационной работы включает системный подход к учету всех аспектов поставленных задач с выделением главного и существенного в создании технологии получения долговечных архитектурно-декоративных самоуплотняющихся бетонов с включением концептуального экспериментального и научного подхода при изучении комплекса фундаментальных положений физико-химии дисперсных пластифицированных систем. Методологические основы экспериментальных исследований заключались в использовании современных стандартных методов и собственных методик для изучения дисперсности и удельной поверхности микрометрических наполнителей, реотехнологических свойств бетонных смесей, их состава и топологии и исследовании физико-технических и гигрометрических свойств бетонов. Объектом исследования являлось управление структурой, свойствами и качеством бетонов, а предметом исследования – решение задачи получения долговечных высокопрочных архитектурно-декоративных бетонов по энерго- и ресурсосберегающим технологиям.

Положения, выносимые на защиту

- принципы проектирования самоуплотняющихся песчаных бетонных смесей на основе реологически-активных дисперсных минеральных порошков, образующих в сочетании с цементом, водой и СП высококонцентрированные агрегативно-устойчивые суспензии;

- рецептурные и технологические приемы регулирования состава архитектурно-декоративных песчаных бетонов с объемным окрашиванием их и формированием различной декоративной поверхности и текстуры;

- разработанные составы и технология получения высокоплотных самоуплотняющихся высокопрочных и сверхвысокопрочных архитектурно-декоративных бетонов и результаты исследований их физико-технических и гигрометрических свойств;

- результаты производственных испытаний и внедрения.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования

Достоверность результатов работы подтверждена сходимостью и воспроизводимостью большого числа экспериментальных данных, не противоречащих известным законам и теориям отечественных и зарубежных ученых. Экспериментальные результаты получены по стандартным высокоинформативным методам и на высокоточном оборудовании, прошедшем метрологическую поверку. Выводы и рекомендации, полученные в работе, официально апробированы и подтверждены результатами производственных испытаний.

Апробация диссертационной работы

Основные положения и результаты работы докладывались:

- на всероссийских и международных НТК: «Актуальные вопросы строительства» (Саранск, 2009, 2010 гг.), «Композиционные строительные материалы. Теория и практика» (Пенза, 2011-2013 гг.), «Новые достижения науки и техники по приоритетным направлениям науки и техники» (Пенза, 2013 г.), «Новости научного прогресса» (София, 2013 г.), «Наука и инновации» (Перемышль, 2014 г.);

- на всероссийских и международных форумах и выставках: международная выставка «Строительный сезон» (Москва, 2010 г.), международный форум «Селигер» (Тверская область, 2010-2013 гг.), молодежный форум ПФО «Волга-2013» (Самарская область 2013 г.).

- на конкурсах: победитель открытого конкурса на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам в вузах РФ (приказ № 470 от 27.05.2010); победитель программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.); участник встречи с президентом РФ Д.А. Медведевым в гиперкубе «Сколково» в числе 200 молодых ученых России в рамках Всероссийского инновационного конвента 2011 г.; лауреат стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013-2015 годы (СП-4621.2013.1); победитель молодежного форума ПФО «Волга-2013» (сертификат 3-й степени за подписью полномочного представителя Президента РФ в Приволжском федеральном округе М.В. Бабича); лауреат XIII Международной специализированной выставки «Мир Биотехнологий 2015».

Публикации

По теме выполненных исследований опубликовано 15 научных статей, из них в журналах по перечню ВАК РФ – 5 научных статей.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 182 наименований и четырех приложений. Диссертация изложена на 227 страницах, содержит 49 рисунков, 37 таблиц. Приложения изложены на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе, посвященной аналитическому обзору литературы, представлен анализ зарубежного и отечественного опыта применения архитектурно-декоративных бетонов нового поколения в современном строительстве. Рассмотрены последние теоретические представления и основные направления и принципы создания самоуплотняющихся тонкозернистых бетонов нового поколения, развиваемые за рубежом.

Анализ работ школы профессора В.И. Калашникова свидетельствует о том, что высокопрочные высокофункциональные бетоны нового поколения – это порошково-активированные многокомпонентные бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности, с измененной топологической структурой от введения оптимизированного содержания реологически-активных и реакционно-активных наполнителей и эффективных СП и ГП.

Выявлено, что основой современных высокопрочных и сверхпрочных СУБ является тонкодисперсная матрица, реологически-активная к действию СП и ГП в суспензиях. Поэтому на современном этапе стратегия создания высокофункциональных высокопрочных СУБ сводится к концепции значительного добавления дисперсных реологически-активных по отношению к СП и ГП наполнителей, увеличивающих объем реологической матрицы. Выбор дисперсных наполнителей должен осуществляться исходя из двух критериев: реологической активности и реакционной активности по отношению к продуктам гидратации цемента.

В связи с этим становится актуальным, экономически и экологически эффективным вовлечение многотоннажных отходов камнедробления в производство бетонов нового поколения (БНП) в качестве основных микрометрических наполнителей и миллиметрических заполнителей.

Рассмотрены теоретические предпосылки повышения долговечности и методы улучшения эстетичных и эксплуатационных характеристик архитектурно-декоративных бетонов.

В соответствии с этим формируется рабочая гипотеза: если получить бетон с высокой плотностью, с чрезвычайно низким водопоглощением, не превышающим $0,8 \div 1,5$ % по массе, с прочностью $100 \div 150$ МПа, то можно обеспечить высокие функции, необходимые для долговечного архитектурно-декоративного бетона. А для сохранения цвета и исключения высолообразования использовать дополнительные защитные меры для сохранения первоначального эстетического вида за счет объемной или поверхностной гидрофобизации.

На основании проведенного анализа теоретических изысканий сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе представлены характеристики используемых материалов, методы исследований, способы и последовательность приготовления бетонных смесей, описаны приборы и оборудование. При изучении реотехнологических

свойств пластифицированных цементных, бинарных и тройных суспензий использовались серые портландцементы (Вольский М500 Д0, Красноярский М500 Д0) и белые цементы отечественного (Коломенский СЕМ I 52,5 Н Holcim Rus) и зарубежного производства (СЕМ I 52,5R, Бельгия; СЕМ I 52,5R Alborg Weit, Египет; СЕМ I 52,5R, Alborg Weit, Дания).

В качестве основных сырьевых компонентов – наполнителей и заполнителей микрометрического и миллиметрического размерных уровней – использовали отсеvy камнедробления гранита, мрамора и известняка, рассеянные на фракции $0 \div 0,16$ мм, $0,16 \div 0,63$ мм, $0,63 \div 2,5$ мм или $0,63 \div 5$ мм соответственно. Каменную муку получали путем помола фракции $0 \div 0,16$ мм в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 3400 \div 4800$ см²/г.

В исследованиях применялось несколько видов пластификаторов: германские ГП Melflux 5581F, СП Melment F10 и отечественный ГП Хидетал-9γ. В качестве окрашивающих компонентов при изготовлении цветных архитектурно-декоративных бетонов использовались различные минеральные пигменты. В качестве разбеливающего компонента применялся фотокаталитический TiO₂.

При изучении действия поверхностно-пропиточной гидрофобизации применяли модификатор «Пента-824». А при изучении структурной объемной порошковой гидрофобизации использовали стеараты металлов.

Определение морозостойкости проводили согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по 3-й ускоренной методике при насыщении образцов 5%-м водным раствором хлорида натрия. Испытания осуществляли в морозильной камере типа КТХ-14 при температуре -50°С.

Микроскопические исследования поровой структуры порошково-активированного песчаного бетона, в том числе окрашенного, выполнялись на микроскопе Digital Blue QX3. Рентгенофазовое исследование взаимодействия фотокаталитического TiO₂ с продуктами гидратации цемента выполнялось на автоматизированном дифрактометре «Emprean» компании PANalytical.

В третьей главе приводится видоизмененная схема топологической структуры порошково-активированной тонкозернистой бетонной смеси нового поколения для окрашенных архитектурно-декоративных бетонов с высокодисперсными пигментами (рис. 1). Условные реологические матрицы в пластифицированных щебеночных бетонных смесях нового поколения подразделяются на три вида: условные реологические матрицы I рода, II рода и III рода.

Реологическая матрица I рода характеризует водно-цементно-минерально-дисперсную систему. В порошковых бетонах с пигментами в роли компонентов такой системы выступают цемент, тонкомолотая порода, пигмент и вода. Такая реологическая матрица способствует свободному перемещению дискретных частиц тонкозернистой породы без взаимодействия друг с другом, создавая необходимую прослойку между этими частицами. Матрица I рода при добавлении тонкозернистого наполнителя фр. $0,16 \div 0,63$ мм становится матрицей II рода. Эта матрица обеспечивает необходимое пространство между дискретно расположенными частицами песка-заполнителя для свободного перемещения их без контакта друг с другом.

Матрица III рода для порошково-активированных щебеночных бетонов – это матрицы I рода, II рода и песок-заполнитель фр. 0,63÷2,5 (5,0) мм. Матрица III рода является готовой мелкозернистой бетонной смесью для формирования песчаных бетонов и фибробетонов.

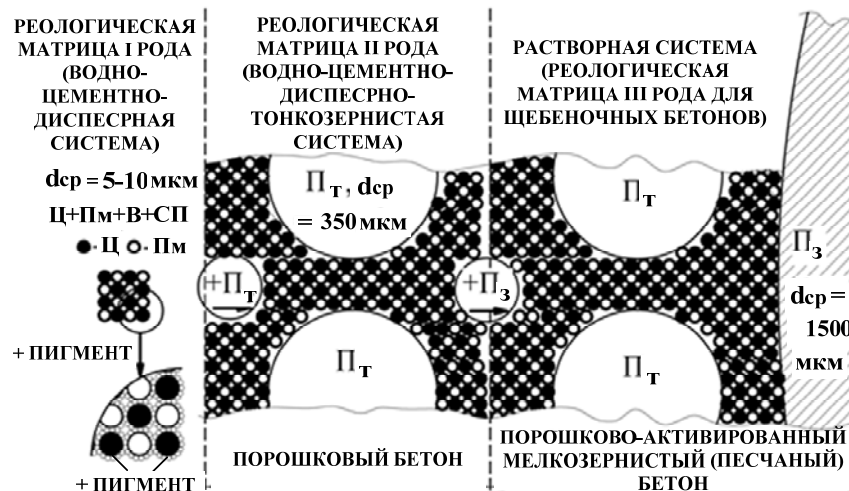


Рис. 1 Схема топологической структуры архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона нового поколения с пигментом

Показаны методические особенности изучения реотехнологических свойств порошковых и порошково-активированных бетонов. Для снижения расходов сырьевых материалов и уменьшения количества экспериментов при выявлении оптимальных реотехнологических показателей и установления необходимого количества воды для самоуплотняющихся бетонных смесей использовали конус Хегерманна. Растекаемость смесей из конуса Хегерманна коррелировали с расплывом смесей из малого конуса ($h=22,1 \text{ см}$; $D=10 \text{ см}$; $d=5 \text{ см}$), предложенного и используемого кафедрой в качестве экспресс-метода. В результате корреляции экспериментальных значений установлена аналитическая зависимость расплыва смеси из малого конуса (P_{KM}) от расплывов смеси из конуса Хегерманна (P_{KH}):

$$P_{KM} = 1,629P_{KH} - 5,95 \quad (1)$$

Построение градуировочной кривой (рис. 2) позволило подтвердить теоретическую зависимость для самоуплотняющихся порошковых и порошково-активированных бетонных смесей.

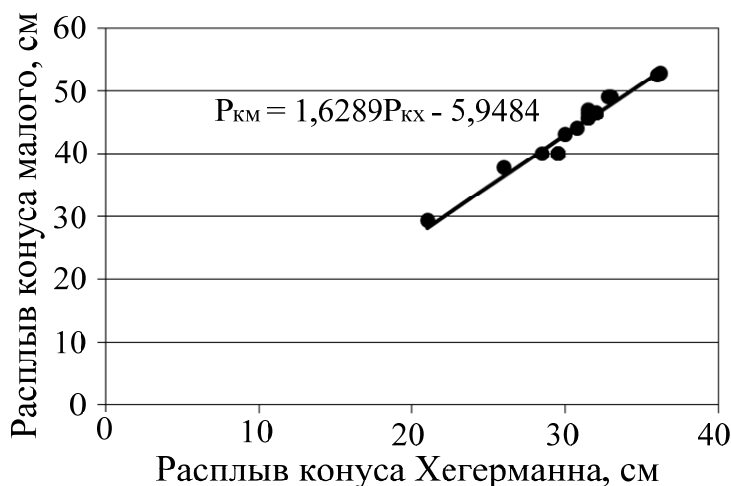


Рис. 2 Зависимость расплыва смеси из малого конуса от расплывов смеси из конуса Хегерманна

Как видно из рис. 2, зависимость значений расплывов малого конуса от расплыва смеси из конуса Хегерманна является линейной в диапазоне диаметров расплыва от 20 до 37 см, с коэффициентом корреляции, равным 0,95. Это свидетельствует о том, что законы реологии при истечении и растекании малоструктурированных жидкостей с чрезвычайно низким пределом

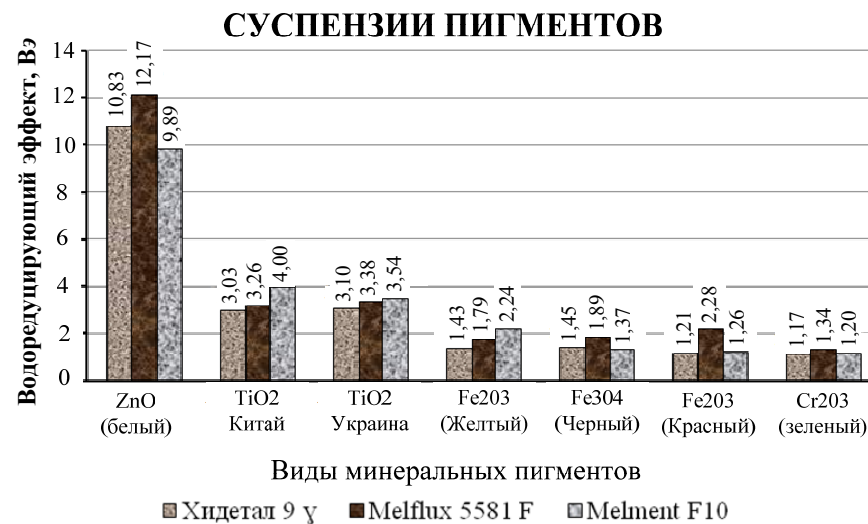
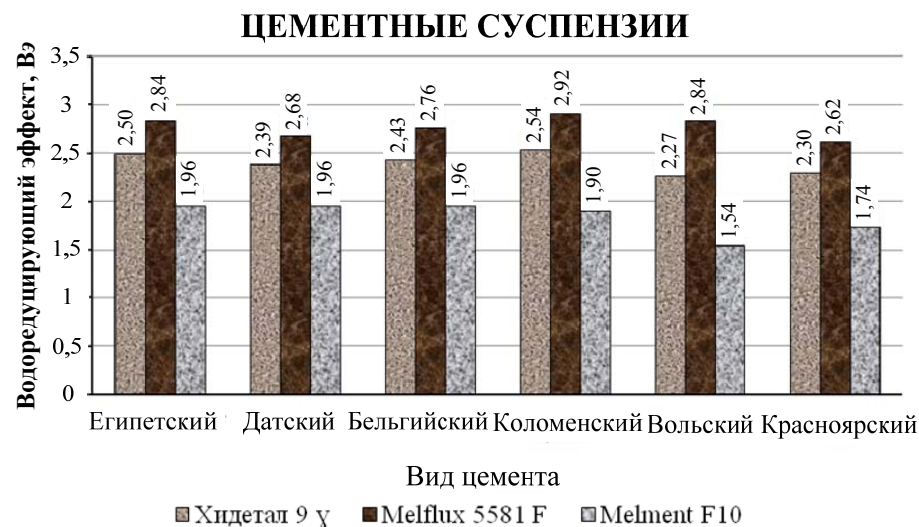


Рис. 3 Значения водоредуцирующих эффектов индивидуальных цементных суспензий, минеральных суспензий, суспензий минеральных пигментов и бинарных цементно-минеральных суспензий с различными пластификаторами

текучести управляют растеканием при истечении из подобных по геометрии и близких по объему растекающихся жидкостей (до определенных границ растекания). Уравнение справедливо при расплыве малого конуса не менее 25-30 см. Пересчет осадки бетонной смеси из малого конуса OK_M на осадку смеси из стандартного конуса $OK_{ст}$ осуществляется по формуле:

$$OK_{ст} = 0,64 \cdot OK_M + 1,36 \cdot OK_M - 0,0068 \cdot (OK_M)^2 . \quad (2)$$

Были выявлены реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты ($V_э$) индивидуальных цементных и минеральных суспензий с различными пластификаторами, бинарными и тройными наполнителями как реологической основы архитектурно-декоративных СУБ. Показано, что максимальные реотехнологические эффекты достигаются при использовании ГП Melflux 5581 F, чуть менее эффективным оказался отечественный ГП Хидетал 9γ (рис. 3).

Изучение реотехнологических свойств чистых минеральных суспензий и бинарных суспензий в комбинации с различными цементами показало возможность использования отходов камнедробления различных горных пород для производства каменной муки как реологически-активного компонента в самоуплотняющихся бетонах. В композиционных суспензиях выявлены синергетические эффекты от действия различных компонентов.

Показана зависимость изменения значений водоредуцирующего эффекта пластифицированной цементно-минеральной суспензии от соотношения компонентов в композиции. Выявлены оптимальные соотношения цемента и каменной муки на примере мраморной и известняковой муки в реологической матрице высокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов. Показано, что максимальный скачок значения водоредуцирующего эффекта в бинарной системе «цемент – каменная мука» достигается при соотношении 50:50 и при дальнейшем насыщении системы дисперсным наполнителем вплоть до соотношения цемента к каменной муке, равного 20:80, значение водоредуцирующего эффекта практически не изменяется (рис. 4).

Из анализа рис. 4 следует, что при добавлении к цементу реологически-активных дисперсных компонентов отчетливо проявляется синергия и достигаются очень высокие значения водоредуцирующих эффектов, превышающие эти значения для цементных суспензий. На графике ломанные кривые изменения значений водоредуцирующего эффекта изученных бинарных систем «цемент – известняк» и «цемент – мрамор» близки к симбатным. Это объясняется тем, что и мрамор, и известняк состоят из $CaCO_3$, но имеют различное генетическое происхождение и дают близкие значения $V_э$ в сочетании с цементом и ГП Melflux 5581F. Если значения прочностных показателей цементно-минерального камня на известняке и мраморе будут также иметь близкие значения, то при выборе дисперсного наполнителя предпочтение следует отдать более распространенному известняку. Таким образом, нами обосновывается перспектива исследования известняковых месторождений для классификации их по реологической активности и использования в БНП.

В результате исследований окрашенных архитектурно-декоративных бетонов было установлено, что при введении минеральных пигментов реотехнологические свойства тонкодисперсной матрицы незначительно улучша-

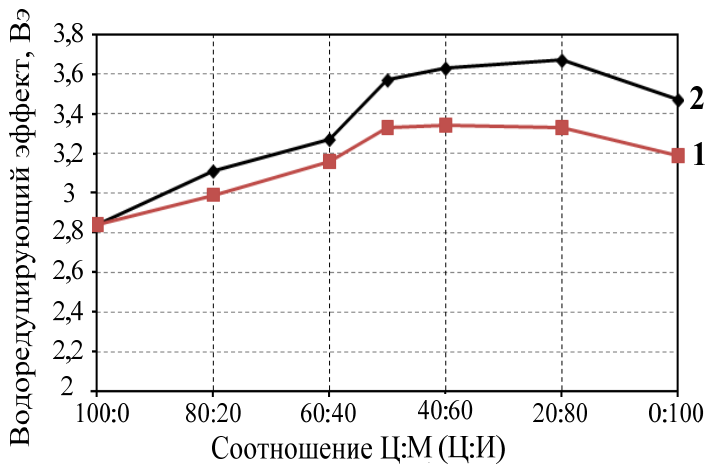


Рис. 4 Значения водоредуцирующих эффектов в бинарных пластифицированных цементно-минеральных суспензиях в зависимости от соотношения в смеси: 1 – цемента (Ц) и мрамора (М); 2 - цемента (Ц) и известняка (И);

нию дисперсности наполнителей и зернистости заполнителя, по водоредуцирующему эффекту, по содержанию водно-дисперсных суспензий в объеме бетонных смесей, по расходу цемента на единицу прочности и способам формирования декоративных поверхностей. Учитывая предложенные способы формирования декоративных поверхностей СУБ с разнообразной фактурой и текстурой, предпринята попытка расширения терминологии архитектурно-декоративных бетонов с учетом их визуального восприятия, технологической и экономической эффективности. По такому принципу лицевые поверхности архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов могут быть: с высокодекоративной глянцевой и матовой поверхностями различного цвета; с мозаичной декоративной поверхностью под текстуру шлифованного природного камня; с «игрой света и тени», образуемых выступами и углублениями различной формы (рис. 5а); с визуализацией графических изображений на поверхности; с поверхностью, имитирующей поверхность пильного и колотого натурального камня (рис. 5б).

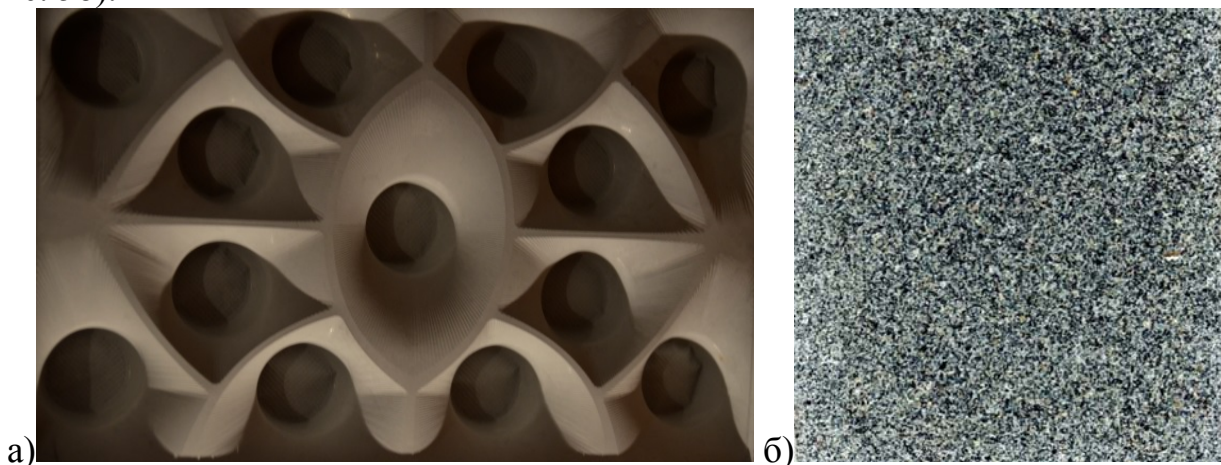


Рис. 5 Вид поверхности архитектурно-декоративного бетона: а) с использованием «игры света и тени» б) с имитацией поверхности гранита

ются, что напрямую связано с их высокой дисперсностью, равной $1200 \div 3500 \text{ м}^2/\text{кг}$, и наличием в них нанометрических частиц верхнего масштабного уровня от 100 до 1000 нм, а также специфической поверхностью для адсорбции молекул ГП, необходимой для образования агрегативно-устойчивых и высококонцентрированных суспензий.

В четвертой главе систематизированы классификационные критерии получения архитектурно-декоративных бетонов нового поколения по возрастанию

Изучено влияние структурной и поверхностной гидрофобизации на реотехнологические, прочностные и гигрометрические показатели порошково-активированного СУБ как способа повышения долговечности и сохранения визуальных эстетических свойств в процессе длительной эксплуатации. Бетон был изготовлен на дисперсном и зернистых компонентах из гранита и имел прочность на сжатие 108 МПа. Выявлено, что объемная структурная гидрофобизация нерастворимым стеаратом цинка в количестве 1% от массы цемента без совместного помола с ним существенно ухудшает реотехнологические свойства бетонной смеси и приводит к значительному снижению темпов набора прочности, а через 28 суток прочность у гидрофобизированного состава на 23 % ниже, чем у контрольного. Плотность снижается относительно контрольного состава с 2437 кг/м³ до 2312 кг/м³.

Безусловно, если бы помол клинкера или домол цемента осуществлялся с сухим гидрофобизатором с образованием наночастиц его на поверхности частиц цемента, то эффективность порошковой гидрофобизации могла бы быть существенно выше. Это было доказано в ранних работах кафедры «ТБКиВ» Пензенского ГУАС.

Было изучено влияние поверхностно-пропиточной гидрофобизации жидким модификатором на гигрометрические показатели порошково-активированного бетона с прочностью 138 МПа, полученного с использованием дисперсного и зернистых компонентов из известняка и добавлением красного железистого пигмента. По результатам испытания был рекомендован пропитывающий модификатор «Пента-824». Водопоглощение образцов, обработанных данным гидрофобизатором, на третьи сутки экспонирования их в воде составило всего 0,17 % по массе, что в 6 раз ниже, чем у контрольного состава. Учитывая низкий расход гидрофобизатора «Пента-824», показана экономическая эффективность его применения. Таким образом, с точки зрения технологической и экономической эффективности нами рекомендовано использование поверхностной гидрофобизации высокоплотных порошково-активированных песчаных бетонов, обеспечивающей сверхвысокие гигрометрические показатели, как способа повышения долговечности и сохранения архитектурной выразительности декоративной поверхности.

Экспериментальным путем получен масштабный коэффициент пересчета водопоглощения по массе образцов-балочек с размерами 40×40×160 мм к образцам-кубам с ребром 100 мм в различные промежутки времени экспонирования образцов в воде (табл. 1). Важно отметить, что экспериментальные значения водопоглощения балочек 40×40×160 мм (W_B) и кубов 100×100×100 мм (W_K) при длительном водонасыщении начинают приближаться друг к другу. Так, через 45 суток водонасыщения отношение W_B/W_K становится равным 1,72. Физический смысл этого изменения связан с геометрическим различием формы и размеров образцов-кубов и образцов-балочек.

Изучено водопоглощение лицевых поверхностей декоративных бетонов с различной фактурой при помощи собственно разработанной методики, заключающейся в воздействии воды исключительно на верхний лицевой слой бетона.

Таблица 1 – Коэффициент пересчета значений водопоглощения с образцов-балочек 40×40×160 мм на стандартные образцы-кубы с ребром 100 мм

Размеры образцов (см)	Время испытания											
	5 мин	15 мин	30 мин	60 мин	1 сут	2 сут	3 сут	4 сут	7 сут	14 сут	1 мес	1,5 мес
	Коэффициент пересчета											
4×4×16 : 10×10×10	2,13	2,12	2,09	2,07	2,05	2,02	1,94	1,91	1,84	1,80	1,77	1,72

Пятая глава посвящена получению высокопрочных самоуплотняющихся порошково-активированных песчаных бетонов (ПАПБ), в том числе окрашенных минеральными пигментами или органическим красителем, с высокой функциональностью, с высокой прогнозируемой долговечностью и изучению их физико-технических и гигрометрических свойств. Разработаны составы бетонов, изготовленных по микротехнологиям без использования реакционно-активного частично-нанометрического микрокремнезема с прочностью на сжатие 125-130 МПа. Они получены на основе отходов дробления гранита, известняка и мрамора, с использованием микрометрических и миллиметрических частиц в виде каменной муки, тонкого дробленого песка и песка-заполнителя, полученных из этих горных пород (табл. 2).

Показано, что для получения высокопрочных СУБ на основе отходов камнедробления различных горных пород при расходе цемента 700 кг/м³ объемная концентрация водно-дисперсной суспензии должна находиться в диапазоне $C_{вд} = 55 \div 60 \%$, а объемная концентрация водно-дисперсно-тонкозернистых суспензий – в пределах $C_{вдт} = 80 \div 85 \%$. При этом объем песка-заполнителя в таких бетонных смесях составляет всего 15÷20 %, что обеспечивает беспрепятственное гравитационное растекание бетонных смесей, пластифицированных ГП Melflux 5581F, благодаря чему получают высокоплотные самоуплотняющиеся смеси с высокой прочностью более 120 МПа.

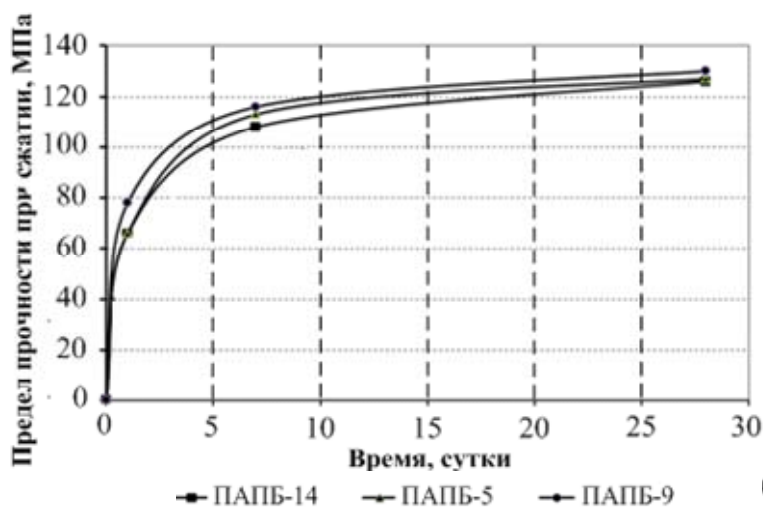


Рис. 6 Кинетика набора прочности порошково-активированных бетонов на различных горных породах

Таблица 2 – Реотехнологические свойства бетонной смеси и физико-технические свойства архитектурно-декоративных ПАПБ на различных горных породах

Наименование		На 1 м ³ , кг	ρ, кг/м ³	$\frac{\Pi_M}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_T}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_3}{\text{Ц}}$	$\frac{\sum \Pi}{\text{Ц}}$	Прочность МПа, R _{вд} / R _{сж} через, сут.		
								1	7	28
ПАПБ-14	Портландцемент Красно- ярский 500 Д0	700	2415	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{9}{66}$	$\frac{11,3}{108}$	$\frac{18,6}{126}$
	Гранит молотый (ПМ), S _{уд} = 3700 см ² /г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,105		Ц _{Рс} ^{уд} = 5,55 кг/МПа; R _Ц ^{уд} = 0,18 МПа/кг; Ц _{Ри} ^{уд} = 37,6 кг/МПа; R _с /R _и = 6,77;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 460×460 мм							
	Песок крупный гранитный (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470	I _{ПТ} ^{вд} = 0,26		V _{вд} = 569,1					
	ГП Melfux 5581F	7	I _{Пз} ^{вдт} = 4,85		C _{вд} = 57,5 %					
ΣМсух.	2177	K _{упл.} = 0,99		V _{вдт} = 820,9						
Вода	230	C _{тв} ^в = 76,7 %		C _{вдт} = 82,9%						
ПАПБ-9	Цемент белый Египетский СЕМ 52,5	700	2392	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{10}{78}$	$\frac{13,1}{116}$	$\frac{18,5}{130}$
	Известняк молотый (ПМ), S _{уд} = 3400 см ² /г	300	В/Ц=0,266		В/Т=0,085		Ц _{Рс} ^{уд} = 5,38 кг/МПа; R _Ц ^{уд} = 0,18 МПа/кг; Ц _{Ри} ^{уд} = 37,8 кг/МПа; R _с /R _и = 7,02;			
	Песок тонкий известняк. (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 430×431 мм							
	Песок крупный известняк. (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470	I _{ПТ} ^{вд} = 2,04		V _{вд} = 528,9					
	ГП Melfux 5581F	7	I _{Пз} ^{вдт} = 4,52		C _{вд} = 54,9 %					
ΣМсух.	2177	K _{упл.} = 0,974		V _{вдт} = 788,1						
Вода	186	C _{тв} ^в = 80,6 %		C _{вдт} = 81,9%						
ПАПБ-5	Цемент белый Египетский СЕМ 52,5	700	2496	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{10}{66}$	$\frac{16,2}{113}$	$\frac{19,1}{127}$
	Мрамор молотый (ПМ), S _{уд} = 3800 см ² /г	300	В/Ц=0,285		В/Т=0,091		Ц _{Рс} ^{уд} = 5,5 кг/МПа; R _Ц ^{уд} = 0,18 МПа/кг; Ц _{Ри} ^{уд} = 36,6 кг/МПа; R _с /R _и = 6,65;			
	Песок тонкий мраморный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 525×522 мм							
	Песок крупный мраморный (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470	I _{ПТ} ^{вд} = 2,21		V _{вд} = 534,6					
	ГП Melfux 5581F	7	I _{Пз} ^{вдт} = 4,79		C _{вд} = 56,9 %					
ΣМсух.	2177	K _{упл.} = 0,985		V _{вдт} = 776						
Вода	200	C _{тв} ^в = 78,6 %		C _{вдт} = 78,6%						

Выявлено, что в самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонах обеспечивается чрезвычайно высокая односуточная и семисуточная прочность при твердении в нормально-влажностных условиях, не имеющая аналогов в отечественной производственной и научно-исследовательской практике: односуточная прочность составляет от 50 % до 62 % от 28-суточной, а семисуточная – от 85 % до 89 % от 28 суточной (рис. 6).

Такая кинетика набора прочности позволяет исключить дополнительные расходы на тепловлажностную обработку и отказаться от введения любых до-рогостоящих наночастиц.

Проведенные исследования выполнены на трех видах горных пород – граните, известняке и мраморе. Но это не исключает использования других прочных горных пород с различными цветовыми оттенками, например, диабаз, диорита, габбро и т.п. Это открывает широкие перспективы для использования отходов камнедробления с карьеров многих горных пород.

Была выявлена позитивная роль минеральных пигментов в повышении прочности (до 7÷9 %) порошково-активированных суспензионных бетонов нового поколения. Установлены оптимальные дозировки окрашивающих компонентов с точки зрения экономической и технологической эффективности: для минеральных пигментов оптимальная дозировка составляет 3÷7 %, для органического фталоцианинового красителя – 0,5 % от массы цемента.

Основываясь на зарубежный научно-исследовательский и практический опыт применения «зеленых технологий» в строительстве, в частности применение диоксида титана в бетонах в качестве фотокаталитического компонента, облагораживающего загрязненный воздух, было изучено его действие на свойства порошково-активированных песчаных бетонов. На основе состава ПАПБ-14 (табл.2) было изготовлено 6 составов с различной дозировкой TiO_2 (от 1 % до 15 % от массы цемента). Было установлено, что в нормированные сроки твердения (через 28 суток) максимальный пик прочности на сжатие наблюдался при дозировке TiO_2 , равной 5 %, и составлял 136 МПа. При дальнейшем увеличении дозировки диоксида титана значения прочности уменьшались (рис. 7а). Иная картина наблюдалась при испытании образцов после 290 суток твердения в нормально-влажностных условиях – максимальное значение прочности достигалось при максимальной дозировке TiO_2 (рис. 7б).

Такой набор прочности в бетонах с TiO_2 можно объяснить тем, что в порошково-активированных бетонах диоксид титана, вероятно, играет роль и реологически-активного, и реакционно-активного компонента, вступающего в реакцию с гидролизной известью в течение длительного промежутка времени. Для доказательства протекающей реакции между TiO_2 и гидролизной известью методом рентгенофазового анализа было установлено формирование новой структурообразующей фазы в системе « TiO_2 - $Ca(OH)_2$ ». Для этого путем полусухого

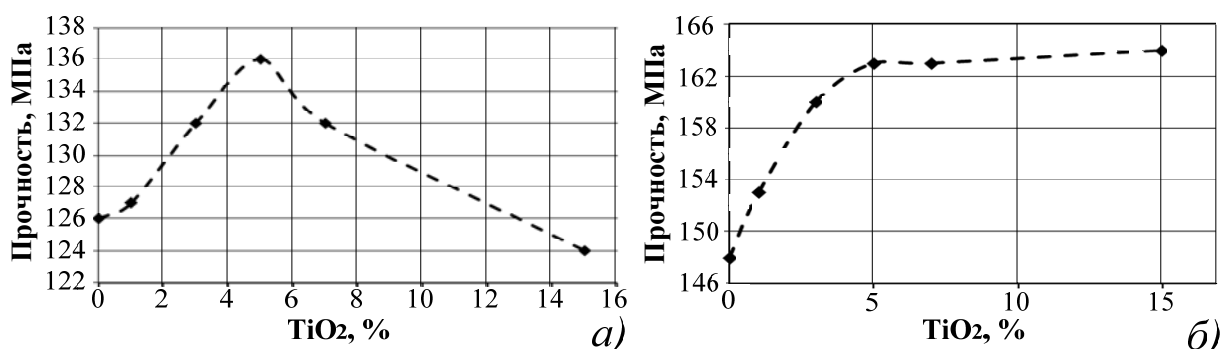


Рис. 7 Зависимость прочности порошково-активированного бетона от дозировки диоксида титана: а) через 28 суток твердения; б) через 290 суток твердения

прессования были заформованы образцы цилиндрической формы с диаметром основания 25,1 мм и высотой 24 мм из смеси состава по массе: TiO_2 – 66 %, $Ca(OH)_2$ – 30 %, цемент белый Египетский – 4 %, вода – 20 % от массы сухих

компонентов. Добавление 4 % портландцемента было обусловлено получением устойчивости прессовки к размыванию материала под влиянием насыщенного пара в автоклаве. Образцы прессовались при удельном давлении 50 МПа. Часть запрессованных образцов хранилась в нормально-влажностных условиях при температуре 20°C, а другая – после 20 суток предварительной выдержки в нормально-влажностных условиях подвергалась автоклавированию по режиму: подъем температуры до 191°C – 1,5 часа; изотермальная выдержка при $t=191^\circ\text{C}$ – 8,5 часов; остывание образцов до $t=20^\circ\text{C}$ – 12 часов.

Было установлено, что все межплоскостные расстояния в рентгенограмме TiO_2 проявились четко, от аналитических до слабых рефлексов. На рентгенограмме состава « $\text{TiO}_2\text{-Ca(OH)}_2\text{-ПЦ}$ », твердевшего в нормальных условиях в течение суток, появились межплоскостные расстояния свободного гидроксида кальция Ca(OH)_2 (2,638 Å; 4,928 Å; 1,929 Å; 1,796 Å). Отдельные чрезвычайно слабые рефлексы в угловых отметках 25°-30°, 30°-35°, 90°-95°, 95°-100° расшифровать не удалось. Все межплоскостные расстояния (всего 37 рефлексов), принадлежащие диоксиду титана на его рентгенограмме, отчетливо проявились и на рентгенограмме состава композиционной смеси. Это свидетельствует о сохранении в значительном количестве свободного TiO_2 . На рентгенограмме автоклавированных образцов интенсивность межплоскостных расстояний уменьшилась, но появились заметные рефлексы новой фазы на угловых отметках 20°, 25°-30°, 30°-35°, 35°-40°, 45°, 50°-60°, 67°, 85°, 98°. Новые интенсивные рефлексы в углах 28°, 32°, 53°, 56° свидетельствовали о синтезе новой фазы, повышающей прочность образцов. Новая фаза нами не была идентифицирована, но мы предполагаем, что это, вероятнее всего, гидротитанат кальция. В нашем случае наиболее важным была не идентификация новой фазы, а оценка сохранения свободного TiO_2 в достаточном количестве в структуре композиции и сохранение его фотокаталитической способности. Было выявлено, что доля свободного TiO_2 , ответственного за фотокаталитические реакции в поверхности изделий из архитектурно-декоративного бетона, практически не уменьшается при нормальных условиях в кратковременные сроки. Но при высокой энергии активации в условиях высокотемпературных гидротермальных воздействий или длительного твердения реакция диоксида титана с гидролизной известью вполне возможна.

Были выявлены закономерности улучшения гигрометрических свойств архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов – чрезвычайно низких значений водопоглощения (0,8÷1,5 %), капиллярного подсоса, деформаций усадки (0,31÷0,52 мм/м) и набухания при оптимизации рецептуры с высоким содержанием суспензионной составляющей, достигающей 75÷82 %. Такие малые значения водопоглощения и усадочных деформаций послужили основанием для обеспечения высокой прогнозируемой долговечности.

Для определения морозостойкости, ответственной за долговечность, была изготовлена серия образцов-кубов с размером ребра 100 мм. Состав бетона подбирался исходя из полученных ранее результатов по определению прочностных и гигрометрических показателей (табл. 3).

Таблица 3 – Реотехнологические свойства бетонной смеси и физико-технические свойства архитектурно-декоративных ПАПБ на известняке

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м ³	Π _М Ц	Π _Т Ц	Π _З Ц	Прочность МПа, через, сут.					
								1	7	28			
ПАПБ-23													
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	730	235,4	0,267	ρ _{вл} 1 сут.	0,41	0,96	0,64	R _{сж} =88	R _{сж} =124	R _{сж} =144			
Пигмент красный, 5% от Ц	36	6,9		2454	$\frac{\sum \Pi}{\text{Ц}} = 2,01$						R _{из} =12	R _{из} =14,6	R _{из} = 19,7
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4											
Известняк молотый (Π _М), S _{уд} = 3700 см ² /г	300	111,1	0,087	ρ _{геор}	I _{ΠТ} ^{ВД} = 2,12 I _{ΠЗ} ^{ВДТ} = 4,65			Ц _{Рс} ^{уд} = 5,0 кг/МПа;	R _Ц ^{уд} = 0,2 МПа/кг	Ц _{Ри} ^{уд} = 36,5 кг/МПа			
Песок тонкий известняк. (Π _Т), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		K _{уп}							V _{вд} = 553,8		
Песок крупный известняк. (Π _З), фр. 0,63÷2,5 мм	470	174		0,993	C _{вд} = 56,1 %								
ΣM _{сух.}	2243	—	Распыль конуса Хегерманна 32,8 см, Распыль К _М 48,3 см	V _{вдт} = 813			R _с /R _и = 7,3						
ΣV _{сух.}	—	792		C _{вдт} = 82,3%									
Вода	195	195		C _{ТВ} ^в = 80,2 %									
M _{б.с.}	2438	—											
V _{б.с.}	—	987											

Определение морозостойкости проводили согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по третьей ускоренной методике при насыщении образцов 5 %-м водным раствором хлорида натрия.

Изучена кинетика прироста массы образцов через каждые 200 циклов замораживания-оттаивания, до 1000 циклов включительно. Вопреки ожиданиям наблюдался прирост массы образцов, что, учитывая крайне низкое водопоглощение по массе на третьи сутки (0,8 %), обусловлено возможной гидратацией и отсутствием деструктивных процессов. После 1000 циклов замораживания-оттаивания прирост массы составил 0,81 % от массы образцов, насыщенных соевым раствором перед началом испытания. В свою очередь, это гарантировало малую потерю прочности или сохранение ее. Необходимо было доказать отсутствие существенных деструктивных процессов и изменения прочности. Предел прочности на сжатие исследуемого бетона после 28 суток твердения в нормально-влажностных условиях составлял 144 МПа, а к моменту окончания испытания на морозостойкость контрольные образцы, хранившиеся в соевом растворе, имели прочность 165 МПа. После 1000 циклов замораживания-оттаивания прочность образцов бетона понизилась со 165 МПа до 162 МПа, т.е. потеря

прочности составила менее 2 %, что находится в пределах ошибки опыта. Стоит отметить не только «рекордные» показатели прочности и морозостойкости разработанного порошково-активированного песчаного бетона без воздухововлекающих добавок, но и необычную картину разрушения образцов (рис. 8).



Рис. 8 Испытание образца-куба с ребром 100 мм окрашенного порошково-активированного песчаного бетона после 1000 циклов замораживания-оттаивания при предельной нагрузке 162 т

Такая картина разрушения образцов говорит о повышенной хрупкости бетона. И если рекомендовать разработанные бетоны в качестве высоконагруженных конструктивных материалов, то необходимо хрупкий характер разрушения устранять введением стальной, минеральной и углеродной фибры или текстильным армированием.

Результаты изучения морозостойкости окрашенного порошково-активированного СУБ показали, что деструкция не проявляется по результатам изменения масс не только под воздействием расширения поглощенной воды при переходе ее в лед, но и в результате расшатывания структуры материала при знакопеременном температурном расширении-сжатии компонентов бетона с различными коэффициентами температурного расширения (третья гипотеза разрушения материала от мороза). А это дает основания утверждать, что разработанные сверхморозостойкие бетоны являются также термостойкими, практически исключая расшатывание структуры от температурных напряжений, т.к. почти все компоненты различного размерного уровня одной химико-минералогической природы и имеют одинаковый коэффициент температурного расширения, за исключением цементного камня.

Полученные высокие физико-технические и гигрометрические свойства архитектурно-декоративных сверхвысокопрочных бетонов, позволили разработать более экономичные СУБ с меньшей прочностью на сжатие, равной 115 МПа, с уменьшенным почти в два раза расходом цемента – 400 кг/м³, с очень низким удельным расходом цемента на единицу прочности при сжатии – 3,48 кг/м³ (табл. 4).

Таблица 4 – Реотехнологические свойства бетонной смеси и физико-технические свойства архитектурно-декоративных ПАПБ на мраморе с расходом цемента 400 кг/м³

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м ³	Π _М Ц	Π _Т Ц	Π _З Ц	Прочность МПа, через, сут.			
								1	7	28	
ПАПБ-24											
Портландцемент Египетский белый 52,5 СЕМ	400	129	0,4	ρ _{вл} 1 сут.	0,87	1,55	2,6	R _{сж} =54	R _{сж} = 86	R _{сж} = 115	
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	4	3		2588							$\frac{\sum \Pi}{\Pi} = 5,02$
Мрамор молотый (Π _М), S _{уд} = 3800 см ² /г	350	120,7	0,067	ρ _{теор}	I _{Π_Т} ^{вд} = 1,94 I _{Π_З} ^{вдт} = 1,75			Ц _{RC} ^{уд} = 3,48 кг/МПа; R _Ц ^{уд} = 0,28 МПа/кг Ц _{RI} ^{уд} = 27,2 кг/МПа R _с /R _и = 7,82			
Песок тонкий мраморный (Π _Т), фр. 0,16-0,63 мм	620	213,8		2607							
Песок крупный мраморный (Π _З) фр. 0,63÷2,5 мм	1040	358,7		K _{уп}	V _{вд} = 415,7						
ΣM _{сух.}	2414	—		0,992	C _{вд} = 42 %						
ΣV _{сух.}	—	825,2	Распыль конуса Хегерманна 30 см, ОКст 26,9 см	V _{вдт} = 629,5							
Вода	163	163		C _{вдт} = 63,7 %							
M _{б.с.}	2577	—		C _{тв} ^в = 83,5 %							
V _{б.с.}	—	988,2									

В результате оптимизации состава порошково-активированного бетона ПАПБ-5 (см. табл. 2) доля цемента была снижена с 700 до 400 кг/м³, количество каменной муки и тонкого песка фр. 0,16÷0,63 мм из отходов камнепиления и дробления мрамора изменилось незначительно, а количество крупного песка фр. 0,63÷2,5 мм увеличилось в 2,2 раза, т.е. доля песка-заполнителя по объему смеси увеличилась с 17,3 % до 36,3 %. Следовательно, объем водно-дисперсно-тонкозернистой матрицы в смеси уменьшился на 19 %, при этом смесь осталась самоуплотняющейся, соответствующей по американской классификации марке SF2, с осадкой стандартного конуса ОК_{ст}=26,9 см. Плотность бетона повысилась на 92 кг/м³ и составила 2588 кг/м³. Нарастание прочности было менее интенсивным, но достаточно быстрым – на первые сутки прочность на сжатие составляла 54 МПа, что вполне достаточно для распалубки в ранние сроки твердения архитектурно-декоративного бетона. Прочность на сжатие в нормированные сроки твердения через 28 суток составила 115 МПа, что всего лишь на 9,5 % ниже, чем у состава с расходом цемента 700 кг/м³. Водопоглощение по массе составило всего 0,5 % после трех суток экспонирования образцов в воде.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать их для изготовления армированных конструкционных бетонов. А возможность значительного снижения расхода цемента при сохранении высоких показателей эксплуатационных характеристик позволяет повысить экономическую эффективность.

В шестой главе представлены технологические схемы получения фракционированных микрометрических наполнителей с удельной поверхностью $S_{уд}=3000\div 4000$ см²/г (1÷100 мкм) и миллиметрических заполнителей с размером зерна 0,16÷2,5 (5 мм) из отходов камнедробления различных горных пород и производства на их основе самоуплотняющихся архитектурно-декоративных порошково-активированных тонкозернистых бетонов, в том числе окрашенных. Даны рекомендации по используемому оборудованию и этапам технологических процессов.

Показана энергоэффективность, экологическая и технико-экономическая эффективность от внедрения архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных СУБ с добавлением большого количества отсевов дробления горных пород фр. 0,63÷2,5 (5,0) мм без использования дорогостоящих микрокремнеземов и наномодификаторов, с расходом цемента 400 кг/м³ вместо 700 кг/м³, с прочностью на сжатие 100÷120 МПа и удельным расходом цемента на единицу прочности – 3,47 кг/МПа.

Выполнена оценка сравнительной стоимости компонентов бетонных смесей порошково-активированных песчаных бетонов с различным содержанием их в 1 м³ бетона с расходами цемента 700 кг/м³ и 400 кг/м³. Показан экономический эффект за счет замены белого цемента СЕМ 52,5 на серый портландцемент СЕМ 42,5 при неостребованности светлого и насыщенных цветовых тонов бетонных изделий и конструкций.

Сформулировано направление развития ресурсосберегающих, энергосберегающих и более экологически чистых технологий производства БНП. Это обосновано сокращением выбросов вредных газов в атмосферу; уменьшением объемов добычи нерудных полезных ископаемых и сырья для производства цемента, и уменьшением расходов энергии и топлива при их добыче, дроблении и помоле; сокращением наращивания чрезвычайно материало- и энергоемкого производства портландцемента; сокращением энергоемкости производства и затрат логистических систем перевозок сырья; заменой централизованно залегающих дорогостоящих и привозных заполнителей более дешевыми местными песками или отходами камнедробления местных известняков, доломитов, гравийно-песчаных смесей и т.д.

Результаты исследований получили производственное апробирование в ООО «Инновационные технологии» (г. Пенза) при изготовлении мелкоштучных декоративных изделий и элементов благоустройства, а также при производстве бетонных блоков с поверхностью, имитирующей гранит, для постамента монументального архитектурно-скульптурного ансамбля «Памятник русскому писателю А.И. Куприну».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Впервые получены высокопрочные самоуплотняющиеся архитектурно-декоративные порошково-активированные песчаные бетоны с окрашивающими компонентами и естественной поверхностью, с разнообразным рельефом и фактурой. Высокопрочные бетоны разработаны с использованием микротехнологий без применения реакционно-активного нанометрического микрокремнезема с формированием состава сухих компонентов из микрометрических частиц цемента, каменной муки, тонкого дробленого песка, а также миллиметровых частиц песка-заполнителя из отходов камнедробления горных пород с прочностью бетона на сжатие $115 \div 144$ МПа, с расходом цемента $400 \div 730$ кг/м³, удельным расходом цемента на единицу прочности $3,5 \div 6,4$ кг/МПа.

2. Установлено, что высокие показатели прочности и других физико-технических свойств бетонов были достигнуты за счет дополнительного введения в рецептуру значительного количества дисперсных и тонкозернистых наполнителей – тонкого дробленого песка миллиметрового размерного уровня фракции $0,16 \div 0,63$. В сверхвысокопрочных бетонах с расходом цемента $700 \div 730$ кг/м³ содержание каменной муки составляло 40 % от массы цемента, а содержание тонкого песка – 100 % от массы цемента; в высокопрочных бетонах с расходом цемента 400 кг/м³ содержание каменной муки достигало 87 %, а содержание тонкого песка – 155 %.

3. В составах самоуплотняющихся бетонных смесей условное объемное содержание высококонцентрированных водно-дисперсно тонкозернистых суспензий – как основы получения СУБ – должно быть не менее $60 \div 65$ % при расходе цемента 400 кг/м³ и не менее $80 \div 85$ % при расходе цемента $700 \div 730$ кг/м³. Таким образом, высокопрочные и сверхвысокопрочные порошково-активированные песчаные СУБ – это практически суспензионные бетоны.

4. Установлены кинетические закономерности ускоренного твердения разработанных архитектурно-декоративных бетонов при температуре 20 ± 2 °С. Выявлено, что в самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонах обеспечивается чрезвычайно высокая односуточная и семисуточная прочность при нормальном твердении, не имеющая аналогов ни в отечественной, ни в зарубежной производственной и научно-исследовательской практике: односуточная прочность составляет от 50 % до 62 % от 28-суточной, а семисуточная – от 85 % до 89 % от 28-суточной.

5. Сверхвысокие качественные показатели полученных архитектурно-декоративных бетонов (прочность на сжатие более 100 МПа, морозостойкость более 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания без потери массы и прочности, водопоглощение – $0,8 \div 1,5$ %, усадочные деформации – $0,3 \div 0,5$ мм/м) не исключают применения их при дисперсном или стержневом армировании и в качестве конструктивных. Поэтому будущее бетонов определяет приоритет микротехнологий над нанотехнологиями в производстве бетона, что не исключает использования реальных нанотехнологий в качестве резерва дальнейшего повышения прочности и других качественных показателей будущих бетонов по микронанотехнологиям.

6. Для обоснования «зеленых технологий» от введения TiO_2 в состав бетона методом рентгенофазового анализа установлено незначительное образование новой структурообразующей фазы в системе « TiO_2 - $Ca(OH)_2$ » при жесткой гидротермальной обработке (давление водяного пара 1,2 МПа, температура 191°C) и сохранение фотокаталитического диоксида титана в значительном количестве в свободном виде в структуре архитектурно-декоративного бетона. Для разработанных самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонов выявлена позитивная роль влияния минеральных пигментов на свойства бетонов нового поколения, в частности, статистически обоснованное повышение прочности до 7÷9 %.

7. Установлена эффективность применения поверхностной гидрофобизации не только для повышения гигрометрических характеристик (снижение значений водопоглощения в 6 раз через 3 суток экспонирования в воде образцов-кубов с ребром 100 мм), но и для сохранения архитектурной выразительности поверхности в течение длительного периода эксплуатации. В качестве пропитывающего гидрофобизатора рекомендован модификатор «Пента-824», не изменяющий визуальное восприятие поверхности после его нанесения. Менее эффективным оказался способ объемной структурной гидрофобизации нерастворимым стеаратом цинка при дозировке 1 % от массы бетона. Его введение не обеспечивает высоких гидрофобных свойств по показателям объемного водопоглощения и капиллярного всасывания и приводит к существенному снижению темпов набора прочности в нормированные сроки твердения.

8. Экономическая эффективность производства архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов от снижения стоимости компонентов при различных расходах их в 1 м^3 , в частности при снижении расхода дорогостоящего белого цемента с 700 кг/м^3 до 400 кг/м^3 и увеличении доли песка-заполнителя фр. 0,63÷2,5 мм с 470 кг/м^3 до 1040 кг/м^3 , составляет 30÷40 %. Кроме того, экономическая эффективность определяется использованием в качестве заполнителей и наполнителей различного размерного уровня отходов камнедробления горных пород, в том числе известняков, что оправданно не только с технологической и экономической точки зрения, но и с позиций экологии. Использование полного спектра фракций отходов камнедробления при производстве наполнителей и заполнителей различного размерного уровня для самоуплотняющихся порошково-активированных бетонов позволяет обеспечить не только сверхвысокие качества бетонов, но и частично решает экологическую проблему, связанную с ростом многотоннажных отходов камнедробления в регионах, имеющих горнодобывающие и горнообогатительные комбинаты.

9. Осуществлена опытно-промышленная апробация разработанных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных СУБ с использованием отходов камнедробления горных пород в ООО «Инновационные технологии» (г. Пенза) при производстве мелкоштучных декоративных изделий и элементов благоустройства, а также при производстве бетонных блоков с поверхностью, имитирующей гранит, для постамента монументального архитектурно-скульптурного ансамбля «Памятник русскому писателю А.И. Куприну».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработанные высокопрочные и сверхвысокопрочные песчаные самоуплотняющиеся бетоны без пигментов и красителей перспективны в качестве конструкционных при изготовлении несущих армированных конструкций и в монолитном строительстве.

2. Разработанные архитектурно-декоративные бетоны рекомендуются к использованию для изготовления тонкослойных отделочных декоративных панелей и изогнутых архитектурных элементов с плавным сопряжением поверхностей с перспективой дисперсного армирования стеклофиброй, базальтовой фиброй или текстилем, необходимого для существенного увеличения прочности на растяжение при изгибе, обеспечивающей бездефектное состояние изделия во время транспортировки и монтажных работ.

3. Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в административных регионах, обладающих карьерами известняков и доломитизированных известняков, при оценке возможности использования отсевов камнедробления для получения дисперсных, тонкозернистых и зернистых наполнителей и заполнителей и применения их для изготовления высокофункциональных песчаных бетонов нового поколения.

4. Результаты диссертационного исследования могут представлять методологическую основу для продолжения исследований и использоваться в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Мороз, М.Н. Высокопрочные декоративно-отделочные поверхностно-гидрофобизированные бетоны [Текст] / М.Н. Мороз, В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, В.С. Янин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1(18). – С. 18-23.

2. Калашников, В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов [Текст] / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, В.М. Володин, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №5. – С. 88-91.

3. Калашников, В.И. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения [Текст] / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпоян // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – №7. – С. 11-21.

4. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом и минеральными породами [Текст] / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70-75.

5. Калашников, В.И. Морозостойкость окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов [Текст] / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, М.Н. Мороз, В.В. Пауск // Строительные материалы. – 2015. – №3. – С. 16-19.

Публикации в других изданиях:

6. Мороз, М.Н. Предполагаемый механизм поверхностной гидрофобизации строительных материалов [Текст] / М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев, В.И. Калашников // Молодой ученый. – 2014. – №11 (70) Ч. 1. – С. 80-83.

7. Калашников, В.И. К терминологии архитектурно-декоративных бетонов [Текст] / В.И. Калашников, И.Ю. Троянов, М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев, В.А. Тяпкин, В.Н. Каледа // VIII Международная научно-практическая конференция «Новости научного прогресса - 2013» (г. София, Болгария). Publishing house Education and Science s.r.o. – С. 99-101.

8. Суздальцев, О.В. Новые высокоэффективные бетоны [Текст] / О.В. Суздальцев, В.И. Калашников, М.Н. Мороз, Г.П. Сехпосян // Новый университет. – 2014. – Том 7-8 (29-30). – С. 44-47.

9. Калашников, В.И. Сверхвысокопрочные фибробетоны с улучшенной дуктильностью [Текст] / В.И. Калашников, В.М. Володин, М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев, Г.П. Сехпосян // Новый университет. – 2014. – Том 7-8 (29-30). – С. 48-51.

10. Суздальцев, О.В. Влияние порошкового гидрофобизатора на прочность и водопоглощение архитектурно-декоративных бетонов нового поколения [Текст] / О.В. Суздальцев, В.И. Калашников, М.Н. Мороз, И.В. Ерофеева // Молодой ученый. – 2015. – №5 (85). Ч. II. – С. 186-188.

11. Калашников, В.И. Облегченные трехслойные крупноформатные стеновые блоки из высокопрочного реакционно-порошкового бетона нового поколения [Текст] / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, О.В. Суздальцев // VIII Международная научно-практическая конференция «Наука: теория и практика - 2013». Sp. zo.o. «Nauka I studia» (Przemysl, Польша). – Publishing house Education and Science s.r.o. – P. 41-44.

12. Калашников, В.И. Новое направление в производстве бетонов общестроительного назначения на основе реакционно-порошковой связки [Текст] / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, С.В. Ананьев, О.В. Суздальцев // Популярное бетоноведение. – 2009. – №6 (32). – С.44-48.

13. Калашников, В.И. Изменение динамического модуля упругости гидрофобизированных бетонов при различных гигрометрических условиях [Текст] / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, Е.А. Белякова, О.В. Суздальцев // Вестник магистратуры. Йошкар-Ола. – 2014. – №7(34). Т.1. – С.44-47.

14. Ананьев, С.В. Влияние тонкости помола и качества кварцевого песка на прочностные свойства порошкового бетона [Текст] / С.В. Ананьев, В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, Р.А. Дрянин // Наука и мир. – Волгоград. – 2014. – №8(12). – С.45-47.

15. Мороз, М.Н. Поверхностно-гидрофобизированные защитные декоративно-отделочные высокопрочные бетоны [Текст] / М.Н. Мороз, С.В. Ананьев, О.В. Суздальцев // 3 Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей, «Алитинформ». – Санкт-Петербург. – 2012. – С.143-148.

Суздальцев Олег Владимирович

ДОЛГОВЕЧНЫЕ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫЕ
ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ КАМНЕДРОБЛЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 27.04.2015. Формат 60x84 1/16
Бумага писчая белая. Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,0.
Заказ № 77. Тираж 100 экз.
Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.
E-mail: office@pguas.ru