

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

"Пензенский государственный университет архитектуры и строительства"

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Заслуженный деятель науки РФ,  
советник РААСН, д-р техн. наук,  
профессор  
Калашников В.И.

Пенза 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ БЕТОНОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ИХ ПРОИЗВОДСТВА.....	15
1.1 Аналитический обзор эволюции бетонов и опыта применения архитектурно-декоративных бетонов нового поколения в современном строительстве.....	15
1.2 Основные принципы создания современных самоуплотняющихся порошково-активированных бетонов нового поколения с использованием отходов горнодобывающей промышленности.....	28
1.3 Теоретические предпосылки повышения долговечности и улучшения эстетичных и эксплуатационных характеристик самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонов.....	35
ГЛАВА 2	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	46
2.1 Характеристика сырьевых материалов.....	46
2.2 Методы исследований, приборы и оборудование.....	54
ГЛАВА 3	
РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ И ИХ КОМБИНАЦИЙ.....	61
3.1 Методические особенности изучения реотехнологических свойств порошковых и порошково-активированных бетонов.....	62
3.2 Реотехнологические свойства пластифицированных дисперсных суспензий с различными пигментами и наполнителями.....	67
3.2.1 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты суспензий из различных цементов, дисперсных наполнителей и пигментов.....	68
3.2.2 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты бинарных суспензий в составе «цемент – дисперсный наполнитель».....	74
3.2.3 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты трехкомпонентных суспензий в составе «цемент – дисперсный наполнитель – пигмент».....	84
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	88

ГЛАВА 4	
ФОРМИРОВАНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
АРХИТЕКТУРНЫХ БЕТОНОВ И ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ	
АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОРОШКОВО-	
АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ СОВРЕМЕННЫМИ	
МОДИФИКАТОРАМИ.....	90
4.1 Классификационные критерии формирования поверхности	
архитектурно-декоративных бетонов.....	91
4.1.1 Формирование высокодекоративных глянцевой и матовой	
поверхностей различного цвета на полимерных формах.....	94
4.1.2 Формирование мозаичных декоративных поверхностей под текстуру	
шлифованного природного камня из горных пород.....	96
4.1.3 Формирование выпуклых и вогнутых декоративных поверхностей с	
использованием «игры света и тени».....	97
4.1.4 Формирование поверхности с визуализацией графических	
изображений.....	99
4.1.5 Формирование поверхности с имитацией фактуры и текстуры	
натурального камня.....	100
4.2 Изучение влияния порошковых гидрофобизаторов на реологические	
свойства бетонной смеси, на прочность и водонасыщение	
архитектурно-декоративных бетонов нового поколения.....	103
4.3 Изучение влияния поверхностной гидрофобизации на свойства	
архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов....	113
4.4 Водопоглощение лицевого слоя архитектурно-декоративного бетона с	
гидрофобной и естественной гидрофильной поверхностями различной	
фактуры.....	120
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	125

ГЛАВА 5	
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ГИГРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	
АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОРОШКОВО-	
АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ.....	126
5.1 Кинетика набора прочности на осевое сжатие архитектурно-	
декоративных порошково-активированных бетонов на различных	
горных породах.....	126
5.2 Изучение влияния окрашивающих компонентов на прочностные	
показатели цветных порошково-активированных песчаных	
бетонов.....	136
5.2.1 Изучение действия нанометрического диоксида титана на	
иницирование прочности бетонов и сохранения $TiO_2$ в свободном	
виде в структуре бетона.....	136
5.2.2 Изучение действия органических пигментов и неорганических	
красителей на свойства порошково-активированных песчаных	
бетонов.....	150

5.3	Водопоглощение и капиллярный подсос архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов.....	157
5.4.	Деформации усадки и набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов .....	167
5.5	Морозостойкость окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов.....	177
5.6	Разработка составов порошково-активированных песчаных бетонов с пониженными расходами цемента на основе отходов камнедробления горных пород.....	187

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5.....	195
------------------------	-----

## ГЛАВА 6

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ И ПРОЦЕДУРА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫХ БЕТОНОВ.....	197
--	-----

6.1	Технологическая схема производства окрашенных порошково-активированных песчаных бетонов и процедура их изготовления.....	197
-----	--	-----

6.2	Технико-экономическая эффективность внедрения архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов .....	201
-----	---	-----

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6.....	204
------------------------	-----

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	206
------------------	-----

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	210
------------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	228
-----------------	-----

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 открывает безграничные возможности дизайнерам, архитекторам и проектировщикам 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 России 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 горнообогатительными 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 проблемой получения самоуплотняющихся бетонов начали заниматься в 1990-1995 г., 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 развитие направления в области получения самоуплотняющихся бетонов, которые за рубежом называют «шагом в будущее», с осадкой бетонной смеси из стандартного конуса 25-28 см, получило с 1995-2000 г. и связано 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 при 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 [114]. 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 [8, 20, 24, 25].

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

### **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 140-160 МПа должно быть в диапазоне не менее 80%-85%;

- впервые систематизированы классификационные критерии формирования поверхности архитектурно-декоративных суспензионных самоуплотняющихся бетонов;

- выявлены кинетические закономерности ускоренного твердения высокопрочных архитектурно-декоративных бетонов с дисперсными наполнителями из отходов камнедробления горных пород. Установлено формирование чрезвычайно высокой односуточной и семисуточной прочности, достигающей соответственно, 55%-60% (55-85 МПа) и 82-87 % (100-120 МПа) от нормированной 28-и суточной ( $R_{сж}=110-140$  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<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub>» при жесткой гидротермальной обработке (давление водяного пара 1,2 МПа, температура 191°С). 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 индифферентные 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/м<sup>3</sup> 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 миллиметрического размерных уровней – рекомендуется использовать, наряду с природными песками, отсеvy 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(5,0) 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 с СП высококонцентрированные агрегативно-устойчивые суспензии;
- рецептурные и технологические приемы регулирования состава архитектурно-декоративных песчаных бетонов с объемным окрашиванием их и с 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, 2012, 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 «Иволга-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 Федерального агентства по образованию № 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; 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.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в оформлении результатов экспериментов и научные консультации при выполнении диссертационной работы кандидату технических наук **Мороз Марине Николаевне**.

# **ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ БЕТОНОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

## **1.1. Аналитический обзор эволюции бетонов и опыта применения архитектурно-декоративных бетонов нового поколения в современном строительстве**

Бурное развитие строительной индустрии в целом предопределило развитие технологии бетонов, к которым сегодня предъявляются жесткие требования. Для современной строительной индустрии, при возросших темпах строительства важно, чтобы бетон позволял создавать конструкции и сооружения, отличающиеся одновременно как высокой несущей способностью и долговечностью, так и высокой художественной выразительностью. Кроме того, бетоны XXI века, помимо повышенных функциональных свойств должны сочетать в себе совокупность высоких экономических показателей и использовать в качестве сырьевых компонентов техногенные отходы, снижая экологическую напряженность в промышленно-развитых регионах.

С этой точки зрения наиболее интересен опыт работ и эволюция создания высокофункциональных бетонов нового поколения, которые по своим качественным показателям отвечают либо превосходят критерии, регламентируемые стандартами различных стран [48, 83, 84, 85, 86].

Значительный скачок развития этого направления отмечается с конца 80-х годов XX века. Говоря о бетонах нового поколения, следует иметь в виду, в первую очередь, высокофункциональные бетоны. Одним из первых сформулировал это понятие канадский ученый П.К. Айчин в 1986 г. (High Performance Concrete – НРС). Айчин П.К. и его последователи видели развитие высокофункциональных многокомпонентных бетонов в достижении максимальных показателей технологичности, плотности, прочности и долговечности, определяющие повышенные эксплуатационные характеристики [115, 116].

Стоит отметить, что высококачественный бетон очень сложный искусственный композиционный материал, обладающий великолепными технологическими свойствами. Кроме того, он превосходно сочетается с окружающей средой, отвечает требованиям экономики строительной индустрии, имеет практически неограниченную сырьевую базу, высокие физико-технические и эксплуатационные показатели, отвечает доступности технологии производства и жестким требованиям экологии регионов, а также позволяет использовать техногенные отходы. Производство таких бетонов имеет сравнительно малую энергоемкость и экологическую безопасность.

Отдельно следует подчеркнуть высокую архитектурно-строительную выразительность, возможность получения изделий абсолютно любой формы, цвета и фактуры поверхности бетонов, заменяющих керамику. Без сомнений, такие бетоны – это не только конструкционный, но и архитектурный материал будущего [63, 64, 66, 67, 69, 70, 180].

Сегодня современные высококачественные бетоны принято условно классифицировать по назначению:

- высокопрочные (Hochfestigerbeton) и ультравысокопрочные бетоны (Ultrahochfestigerbeton) [86, 88, 89, 90];
- самоуплотняющиеся бетоны (Selbstverdichtender Beton – SVB) [84,85];
- высококоррозионностойкие бетоны [87].

В особую группу выделяются реакционно-порошковые дисперсно-армированные бетоны, в которых обеспечивается высокое сцепление матрицы с фиброй. (Reaktionspulver beton - RPB или Reactive Powder Concrete – RPC) [83, 91, 92, 93].

Переходу на новые виды бетонов предшествовали как достижения в области пластифицирования бетонных и растворных смесей, перевернувшие представления о реологии бетонных смесей, так и появление наиболее активных добавок – дегидратированных каолинов, высокодисперсных зол и микрокремнеземов [94, 95]. Это способствовало увеличению количества компонентов в бетоне, применяя химические добавки, до 8-9 с заметным



снижением водоцементного отношения (В/Ц) до 0,25 и сохранением пластичности.

Благодаря революционным достижениям в области пластифицирования бетонных смесей стало возможным создание высокопрочных бетонов, обладающих высокими функциональными и эксплуатационными свойствами.

Кроме того огромную роль в переходе на высокопрочные бетоны сыграло создание специальных цементов. Изменения касались, в первую очередь, активности цемента, которая должна была быть не ниже 50 МПа. Этот факт, без сомнений, дал возможность получения бетонов высокой прочности, в то же самое время, обладающих другими принципиально новыми качественными эксплуатационными характеристиками.

В отечественной практике одними из первых проблемами создания высокопрочных бетонов занимались М.Н. Ахвердов [117], Михайлов В.В. [118, 119], Михайлов К.Б. [120, 121, 122]. Но рецептура бетонов того периода была как правило четырехкомпонентной, история которой начиналась в 1830-1840 гг. и продолжается поныне. Такие бетоны имели ряд дефектов, связанных с недоуплотнением или с большим количеством макродефектов. Бетонные смеси не являлись предельно текучими и высокоредуцируемыми в связи с небольшим содержанием цементно-водной дисперсии и большого количества песка и щебня в объеме бетонной смеси. Основным фактором, позволяющим достичь высокой прочности, было интенсивное виброуплотнение (чаще с пригрузом) жестких смесей с низким водоцементным отношением. Так, автором [123] было отмечено, что в начале 70-х годов XX века высокопрочные тяжелые бетоны марок М 600-700 получали за счет использования высокоактивных цементов в бетонных смесях с низкими В/Ц, интенсивного уплотнения с пригрузом, повторного вибрирования, вибропрессования и центрифугирования.

Символический рубеж прочности равный 100 МПа в промышленном масштабе покорился уже в 1982-1984 гг. Это произошло благодаря

активному внедрению эффективных суперпластификаторов (СП) на нафталинсульфонатной и меламинсульфонатной основе, но время самоуплотняющихся бетонов к тому моменту еще не пришло. Гиперпластификаторов (ГП) на полигликолиевой, поликарбоксилатной и полиакрилатной основе [84, 85, 96] позволили получать сверхтекучие бетонные смеси, начиная с 1995-2000 гг. На этом этапе появляются, так называемые «бетоны переходного поколения». Они определяются как четырехкомпонентные бетонные смеси состава «цемент – песок – щебень – вода», основой пластификации которых являются только высокоэффективные супер- и гиперпластификаторы (СП и ГП), действие которых характеризуется высоким водоредуцирующим эффектом. Этот период переходных бетонов также связан с добавлением микрокремнезема.

Сегодня механизм действия СП и ГП, практически изучен. Он заключается в адсорбции молекул СП, с изменением ионно-электростатического одноименного заряда частиц и электрического потенциала и стерическими эффектами [8, 50]. Но в бетонах традиционного четырехкомпонентного состава действие СП и ГП распространяется только на дисперсную фазу. Дисперсной системой, которая определяет реологию бетонной смеси, является только цементно-водная дисперсия. При малом содержании цемента в бетонной смеси, мало и содержание водно-дисперсной фазы, которая обеспечивает реологическое действие СП. Поэтому высокого пластифицирования и водоредуцирования бетонной смеси можно было достичь только в цементоемких бетонах.

Бетонные смеси с различными расходами цемента сегодня можно условно классифицировать по уровню водоредуцирования следующим образом [140]: расход цемента 400-600 кг/м<sup>3</sup> – водоредуцирующий эффект 20-35 %; расход цемента 250-300 кг/м<sup>3</sup> – 10-15 %; расход цемента 150-200 кг/м<sup>3</sup> – 5-7 %.

Делая выводы из вышесказанного, следует отметить, что современные пластификаторы малоэффективны в бетонах с низким расходом цемента.

Чтобы повысить эффективность, просто необходимо вводить в бетонные смеси значительное количество дисперсной фазы, в виде дешевых дисперсных наполнителей с удельной поверхностью  $S_{уд} = 3000-4000 \text{ см}^2/\text{г}$  [2, 8, 20, 25].

Учитывая сегодняшние проблемы утилизации отходов горнодобывающей промышленности фр.0-5 мм, можно с уверенностью констатировать необходимость применения таких отходов в производстве бетона в виде дисперсных наполнителей.

Авторами [3, 5, 51, 71, 141, 153, 154] дана оценка перспективам вовлечения отходов горнодобывающего производства в хозяйственную деятельность. Горнодобывающая промышленность не является отраслью безотходного производства. Ежегодно отмечается стабильный рост объема отходов, значительно превышающий рост объема производства минеральной продукции. Поэтому исходя из экологических и экономических принципов просто необходимо использование отходов камнедробления.

В индустриально развитых странах вовлечение вторичного техногенного сырья в хозяйственную деятельность значительно превышает показатели России и стран СНГ. Так в работе [4] академик РАН Ю.Н. Малышев приводит такие данные: в США и странах Западной Европы горнопромышленные отходы используются на 85-90 %. Для России этот показатель составляет примерно 20-25 %.

Такое значительное отставание связано с рядом как объективных, так и субъективных причин, в частности из-за крайне низкого коэффициента внедрения инноваций в разные сектора реальной экономики. Еще одним важным фактором является отсутствие мотивации применения техногенного сырья, вызванной различными экономическими стимулами и предпочтениями со стороны государства. Кроме того, в России до сих пор практически отсутствуют четкие законодательные акты в области недропользования.

В условиях современной строительной индустрии основным потребителем минеральных ресурсов является область производства

строительных материалов. По данным ВНИПИИстромсырье (г.Москва) доля нерудных строительных материалов в минеральном сырье, используемых для производства строительных материалов в России составляет 70%. В США, для сравнения, этот показатель около 82%. [3, 51]

Оценивая объемы и виды вторичного минерального сырья, пригодного для использования при производстве строительных материалов, следует обратить внимание на данные Министерства природных ресурсов РФ, согласно которым только в 2011 году из 4303 млн. т отходов 1-5-й групп 3819 млн. т приходится на долю горнодобывающей отрасли. В своей работе [4] академик РАН Малышев Ю.Н. апеллирует следующими данными: «Ежегодно в результате работы горнопромышленных предприятий образуется около 7 млрд. т отходов, в том числе 2,5-5 млрд. т отходов добычи и обогащения, из которых используется лишь 2 млрд. т (28,6 %). В отвалах и хранилищах накоплено около 80 млрд. т только твердых отходов».

Особое место среди отходов горнодобывающей промышленности следует отвести отсевам дробления, которые идеально подходят для использования их в качестве наполнителей для бетонов нового поколения.

Сегодня по различным оценкам в России объемы отсевов дробления составляют порядка 80-90 млн. т в год. В свою очередь, только 20-30 % таких материалов находят потребителя [3, 5, 51]. Отсюда делаем вывод, что около 60 млн.т отсевов горнодобывающей промышленности ежегодно пропадают в отвалах. Такое положение дел будет сохраняться и далее, если не найти эффективную сферу их подготовки и применения. Самая высокочемкая сфера применения отсевов камнедробления – производство бетонов. Но эта отрасль будет использовать отсевы камнедробления в том случае, если бетоны на их основе будут технически и экономически более эффективными. Мелкозернистые (песчаные) бетоны на основе отсевов камнедробления фр. 0-5 мм будут эффективнее щебеночных бетонов переходного поколения лишь в том случае, если они превратятся в порошково-активированные мелкозернистые бетоны.

В перспективе щебеночные бетоны общестроительного назначения, высокопрочные и сверхвысокопрочные будут вытеснены порошковыми, реакционно-порошковыми и порошково-активированными песчаными бетонами нового поколения. Производство щебня для бетона потеряет необходимость. Щебень будет производиться только для отсыпки железнодорожного полотна и верхней частицы дорожного основания автомобильных дорог. Отсевов камнедробления фр. 0-5 мм от этих производств будет достаточно для обеспечения выпуска бетонов нового поколения. Такой смелый прогноз позволяют сделать нам многочисленные работы кафедры «ТБКиВ», а позже объединенной кафедры «ТСМиД» Пензенского ГУАС, под руководством д-ра техн. наук В.И. Калашникова, результаты которых показывают реальную возможность создания высокоэффективных, высокоэкономичных песчаных бетонов с прочностью от 20 МПа до 150 МПа.

Таким образом, можно констатировать, что использование отходов горнодобывающей промышленности для создания современных высококачественных бетонов дает: во-первых, существенный запас сырьевой базы; во-вторых, отвечает жестким современным требованиям технологии бетонов; в-третьих, является экономически-обоснованным фактором; в-четвертых, значительно снижает нагрузку на окружающую среду.

В связи с этим, отсеvy дробления идеально подходят для использования их при изготовлении современных порошковых и порошково-активированных бетонов в качестве высокодисперсных наполнителей, значительно повышающих количество дисперсной фазы в составе.

В своей докторской диссертации профессор В.И.Калашников [97], на основе ранее выполненных работ с 1979 по 1996 [98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107] сформулировал концепцию предельного концентрирования цементных смесей тонкодисперсными порошками из пород различного происхождения по уровням высокого водоредуцирования их к СП.

Позже в своей работе [6] профессор В.И. Калашников дал классификацию дисперсным тонкозернистым наполнителям согласно их функциям в бетонной смеси: реакционно-активные и реологически-активные. И если реологически-активные порошки обеспечивают высокую степень разжижения дисперсной фазы в смеси и увеличивают объем суспензии, то реакционно-активные характеризуются интенсивной реакцией взаимодействия аморфного кремнезема с портландитом.

Таким образом, для получения современных высококачественных бетонов, необходимо не только реологически активировать СП и ГП, но и вводить реакционно-активные порошки (микрокремнезем (МК), дегидратированный каолин и многое другое) [2]. Но для создания светлых и насыщенных цветных тонов архитектурно-декоративных бетонов высокодисперсный микрокремнезем с темным оттенком не приемлем. Микрокремнезем, повышающий прочность бетонов нового поколения, должен быть исключен, при этом высокая прочность должна быть сохранена.

Сочетание СП и ГП с микрокремнеземом, каменной мукой и тонкозернистым песком предопределили появление реакционно-порошковых бетонов, прочность на сжатие которых достигает 150-200 МПа.

Последние годы бетоны, эволюционируя от традиционных четырехкомпонентных к многокомпонентным высокофункциональным бетонам, повысили уровень прочности на сжатие до 150-200 МПа. Но при столь заметном повышении прочности, снизился коэффициент Пуассона до 0,14-0,17, что привело к риску хрупкого разрушения конструкции при чрезвычайных ситуациях. Решить эту проблему удалось путем армирования бетона. Сегодня используют различные способы армирования, в том числе, с введением волокон из стали, минеральных расплавов и полимеров [25, 93]. Применение различных армирующих элементов явилось еще одним прорывным этапом в области эволюции бетонов.

Реализация особых технических свойств бетонов нового поколения открыла практически безграничные возможности для возведения уникальных

зданий и сооружений по всему миру [9, 113]. На этом фоне значительно выделяется супер-сооружение современности «Бурдж-Халифа» в Дубае. Высота небоскреба составляет 828 метров, а сам небоскреб является самым высоким из когда-либо существовавших сооружений в мире.

В России применение самоуплотняющихся высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов приняло широкий масштаб значительно позже, чем в Западно-Европейских странах, США, Канаде и Японии. Одним из наиболее заметных объектов, возведенных с применением бетонов классов В 80-90, модифицированных МК до сих пор являются строения комплекса «Федерация» ММДЦ «Москва Сити». На строительных участках комплекса использовался бетон с прочностью 87-106 МПа с расходом цемента 460-550 кг/м<sup>3</sup> бетона [124].

Совершенно очевидно, что переход на строительство из бетона нового поколения – актуальнейшая народно-хозяйственная задача, которая значительно повысит экономику строительства, а также украсит архитектуру зданий и сооружений.

К сожалению, на сегодняшний день в России проблема широкого применения высокопрочных и сверхвысокопрочных самоуплотняющихся бетонов нового поколения заключается в недостаточно быстром освоении методов расчета несущих конструкций из сверхвысокопрочного бетона. В связи с этим, крайне актуальным видится широкое применение таких бетонов при изготовлении всевозможных декоративных архитектурно-отделочных изделий, на примере которых можно показать их уникальные возможности.

Современная строительная концепция предполагает обязательное создание гармонии между человеком и его средой обитания. Характеризуется это понятием «Ландшафтный дизайн», который предполагает малые архитектурные формы, ландшафтные скульптуры, цвет и архитектурный стиль зданий и сооружений и многое другое. Для изготовления малых архитектурных форм и ландшафтной скульптуры применяются различные материалы: дерево, полимеры, сплавы металлов, природные каменные

материалы, но в последнее время по всему миру широкое применение получил архитектурный бетон [63, 64, 66, 67, 69, 70].

В России впервые самоуплотняющийся реакционно-порошковый бетон в качестве архитектурного бетона с прочностью на сжатие 180-200 МПа был применен при отливке памятника Победе в Великой Отечественной войне и обелиска «Аллея Победы» в 2010 г. в Красноярском крае по рекомендациям и разработкам кафедры «Технологии бетонов, керамики и вяжущих» Пензенского ГУАС (рис 1.1) [10].



Памятник «Возвращение» (г. Красноярск-45)



Обелиск в честь 65-летия Победы в ВОВ

Рис. 1.1 Опыт применения высокопрочного бетона нового поколения [10]

В отечественной практике производства архитектурно-декоративных бетонов обращает на себя внимание продукция компании «Систром» по технологии «мрамор из бетона». Эта технология предполагает производство архитектурного бетона высокой прочности на сжатие до 100 МПа, на растяжение при изгибе до 15 МПа, морозостойкостью более 500 циклов, с водопоглощением около 3 %. Технология позволяет получать тонкостенные изделия толщиной 3 мм с глянцевой поверхностью. Причем это достигается без термической обработки и дополнительной полировки поверхности. Благодаря использованию пигментов и подбору фактуры поверхности форм, получаются изделия с характерной для натуральных камней фактурой цвета и рисунком. За схожесть бетона с природными каменными материалами технология получила название «мрамор из бетона» [11].

Особо ценен зарубежный опыт применения самоуплотняющихся высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов при создании архитектурных



и декоративных бетонов [12, 13, 17, 19, 61, 62, 65, 68, 125]. Так, в работе [125] представлен обзор практического применения самоуплотняющихся бетонов (СУБ) в европейских проектах. Но автор ориентируется на строительных проектах при применении СУБ достаточно низких марок.

Сегодня использование высокопрочных СУБ открыло новые возможности в области дизайна архитектурных фасадов. Так, новое здание музея Форарльберга в Брегенце (Австрия) в качестве фасада здания имеет бетонный рельеф площадью 1300 м<sup>2</sup>. Рельеф состоит из 16 656 бетонных цветков, распускающихся на гладкой бесшовной поверхности декоративного бетона. Сами цветы являются отпечатками обычных пластиковых бутылок, которые гармонично дополняют и завершают облик здания. Неоднородность компонентов здания подчеркивается за счет различных фасадных структур и текстур поверхности, которые сливаются воедино благодаря единому цветовому оформлению [12].

В Германии в центре г. Вупперталь был возведен новый административно-деловой центр, с использованием инновационных фасадных технологий. При возведении был использован специально разработанный СУБ с применением белого цемента, что позволило получить превосходный цвет слоновой кости. Кроме того, на бетонные изделия были нанесены водоотталкивающие составы в целях защиты поверхности от агрессивных воздействий окружающей среды [13].

Учитывая высокие функциональные показатели, такие конструкционные фасады, кроме того, что открывают архитекторам и проектировщикам безграничные возможности оформления фасадов, выполняют и важные несущие функции.

С развитием текстильного производства и использованием ткани из стекловолокна в качестве армирующего элемента, стало возможным создание изделий одинарной и двойной кривизны толщиной в несколько сантиметров. Это открывает широчайшие возможности для создания уникальных строительных элементов различного функционального назначения.

В исследованиях [14] рассмотрена методика изготовления сборных железобетонных изогнутых тонкостенных панелей с использованием «Технологии гибкой формы». Эта технология позволяет получать элементы абсолютно любой геометрической формы со свободно оформленными кромками, с прочной и гладкой поверхностью. К примерам внедрения данной технологии можно отнести уникальные по своей красоте и архитектурной выразительности сооружения: проект озелененных зданий Verdana (архитектурное бюро NL Architects) и культурный центр им. Гейдара Алиева (г. Баку, Азербайджан) [15].

Отдельного внимания заслуживают проекты архитектурно-отделочных и декоративных бетонов с использованием ультрасовременных технологий. К таким проектам относится светопрозрачный бетон, разработанный венгерским архитектором Ароном Лаконзи в 2004 году. В основе разработки лежит использование стекловолокна по всей толще бетона, которое пропускает свет сквозь бетон. Проект «Chronos Chromos Concrete» – представляет собой бетон, меняющий свой цвет посредством компьютерных программ (рис. 1.2) [16, 62].



Рис. 1.2. Светопрозрачный бетон – «Lucem»

Широчайшие возможности с позиций эстетического восприятия при разработке дизайнов бетонной поверхности открыли разработанные стеклянные гранулы «Fabrino Color Goats». Инновационным свойством этой разработки является особый вид пластикового покрытия, которое защищает стекло и бетон от контакта и реакции друг с другом [19].

Интересен и проект «HelioClean», финансируемый Министерством образования и науки ФРГ (BMBF). Проект направлен на получение новых знаний по проблеме «применения строительных материалов с функциональными нанотехнологическими группами для фотокаталитической очистки воздуха и поверхности», в частности речь идет о разложении окислов азота  $\text{NO}_2$  на поверхности бетонов [17]. Фотокаталитические цементосодержащие материалы впервые были применены итальянской компанией «Italcementi» при строительстве церкви «Dives in Misericordia» в г. Рим [16]. Такой положительный опыт применения «зеленых технологий», обеспечивающих бетонным поверхностям свойства самоочищения с экологически-облагораживающей воздух функцией, предопределил применение фотокаталитического диоксида титана в дальнейших архитектурных Европейских и Японских проектах. Сегодня в странах западной Европы область применения фотокаталитических бетонов неуклонно растет, в частности, такие материалы используют для устройства автомобильно-дорожных туннелей и их отделки, и всевозможных конструкций с большими горизонтальными и вертикальными поверхностями (кровельные панели, облицовочные панели, блоки мостовых и их плиты, инженерное оборудование улиц и мн.др.)

Фотокаталитические цементосодержащие материалы были использованы в архитектурных проектах в Германии, Бельгии, Италии, Испании, Франции, Японии [16, 18, 171, 172]. Например, во Франции «зеленые технологии» с применением  $\text{TiO}_2$  были применены при строительстве станции метро «Porte de Vanves» в Париже. В Японии фотокаталитические поверхности применяются в аэропортах для контроля содержания вредных веществ в воздухе. В Италии впервые фотокаталитические покрытия были использованы в качестве дорожного полотна в туннеле «Via Porpora» в г. Милан.

Россия существенно отстает от ведущих индустриальных стран в области внедрения фотокаталитических бетонов в массовое производство.

Отечественный обзор литературных источников позволил выявить проект «Разработка составов, технологии изготовления экологически чистых отделочных материалов на основе гипсоцементных смесей, содержащие адсорбционно-каталитические наноконпоненты...», который реализовывался Российской инженерной академией по заказу правительства г. Москвы [172].

Совершенно очевидно, что будущее архитектурно-декоративных бетонов определяют технологии, позволяющие формировать уникальные синергетические характеристики с позиции эстетического восприятия и экологической эффективности.

Таким образом, из аналитического обзора эволюции бетонов и их практического применения видно, что в области бетонов нового поколения и их внедрения в промышленность, в частности архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов, отечественная практика значительно уступает практике высокотехнологично развитых стран. Учитывая то, что высокопрочные порошково-активированные бетоны практически не используются в России в конструкционных целях, ввиду отсутствия методов расчета несущих элементов из сверхвысокопрочного бетона, то совершенно четко видится актуальность использования их в области архитектурных решений. Да и бетоны с высочайшими техническими свойствами в России никто не производит, хотя изготовление их возможно из отходов камнедробления без микрокремнезема. Использование отходов камнедробления при изготовлении декоративных бетонов может значительно улучшить качество бетона, снизить энергоемкость производства, повысить экономические показатели, а главное, решить проблему их утилизации.

## **1.2. Основные принципы создания современных самоуплотняющихся порошково-активированных бетонов нового поколения с использованием отходов горнодобывающей промышленности**

В связи с развитием технологий по созданию СУБ, в частности реакционно-порошкового бетона нового поколения, позволяющего получать тонкостенные изделия абсолютно любых конфигураций и форм,

большинство инженеров и архитекторов рассматривают такой бетон, не только как конструкционный материал, но и как материал с особыми уникальными свойствами с позиции архитектурных и дизайнерских требований. Говоря о бетонах нового поколения, следует иметь в виду целый ряд отличительных признаков от традиционных бетонов старого и переходного поколений.

Основные принципы получения высокопрочных и сверхпрочных бетонов нового поколения в отечественной практике впервые сформулировал д.т.н., профессор В.И. Калашников [114]. 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 по микротехнологиям [8, 20, 24, 25].

Сегодня с развитием нанотехнологий в различных сферах промышленности, в том числе области строительных материалов, стало модным связывать бетоны нового поколения именно с нанотехнологиями. В настоящее время можно встретить огромное количество зарубежных и отечественных публикаций по данной тематике по известковым, гипсовым и цементным технологиям с применением наноуглеродных частиц в микродозах – одномерных нанотрубок, наночастиц  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , нанокальцита, наноглины, астраленов, фуллеренов, фуллероидов и т.д. [21, 33, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 154]. Однако в некоторых публикациях существует большое количество противоречий с фундаментальными положениями химии и физики бетона.

Например, автором [21] в своей работе представлены результаты повышения технических и технологических показателей бетона при добавлении 0,001-0,003 % от массы бетонной смеси. Следует отметить, что исследования проводились в бетонах без добавления СП и микрокремнезема, т.е. в бетонах старого поколения. Согласно результатам исследований, полученные бетоны по свойствам значительно уступают высокопрочным

высокофункциональным бетонам нового поколения, в состав которых не вводятся наноуглеродные модификаторы. Это говорит о том, что введение в состав микродоз наночастиц на «реологически пассивной» рецептуре не позволяет достигать высокой прочности, относительно бетонов нового поколения, разработанных по микротехнологиям. В свою очередь, при использовании наноразмерных реакционно-активных кремнеземов и дегидратированного каолина, вводимых в относительно большом количестве (от 10 до 30% от массы цемента), получаются реально высокие результаты.

В своих исследованиях [22] В.И. Калашников расчетным методом доказывает, что при введении в состав наноуглеродных частиц в микродозах лишь несущественно можно повысить прочность. Это связано с тем, что в структуре бетонов существует огромное количество микро- и макродефектов. А учитывая, разницу размерных уровней составляющих компонентов в структуре бетона, исключить микродефекты и макродефекты благодаря введению нанометрических частиц в очень малом количестве просто невозможно! Именно поэтому на современном этапе создание бетонов нового поколения должно осуществляться, в первую очередь, по микротехнологиям [108, 109, 181].

Исходя из основных положений науки о бетонах, в частности химии гидратации цемента, теории гидросиликатного твердения и реологии водно-минеральных дисперсных систем, автором [22] выводятся следующие принципы при создании пластифицированных бетонов нового поколения:

- для уменьшения макрометрических дефектов использовать макрометрические зернистые компоненты с плотной упаковкой зерен;
- для уменьшения миллиметрических дефектов за счет значительного снижения В/Ц вводить значительное количество реологически-активных с СП микрометрических минеральных дисперсных частиц с  $S_{уд} = 3000\text{--}4000 \text{ см}^2/\text{г}$ ;
- для усиления ранней кристаллизации и ускоренного набора прочности добавлять нанометрические зародыши кристаллизации

гидросиликатов с одинаковым минеральным составом;

- для уменьшения капиллярной пористости в роли дополнительного цементирующего компонента в порах цементного камня, использовать нанометрические частицы активного кремнезема, необходимые для трансформации несвязного портландита в гидросиликаты кальция.

Поэтому нанотехнологии при создании высокофункциональных высокопрочных бетонов, сводятся к наноразмерным добавкам, в частности реакционно-химическим нанокремнеземам. По масштабному уровню частицы нанокремнеземов делятся на аэросилы – пирогенные нанокремнеземы, и осажденные кремнеземы и кремнезоли [23]. Частицы свежесажженного кремнезема обладают самыми маленькими размерами ( $S_{уд} = 50000-70000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), но, к сожалению, при его повышенном содержании и высокой удельной поверхности ГП не в состоянии реализовать свое действие в полном объеме. Поэтому такие нанокремнеземы следует добавлять в пределах 1-2 %, сочетая их с нанокремнеземами, имеющие средний либо верхний масштабный уровень.

Благодаря технической революции в области помола и с разработкой планетарных мельниц потенциальная нехватка микрокремнеземов и нанокремнеземов будет восполняться за счет сверхтонкого помола металлургических шлаков и зол с необходимым числом частиц верхнего нанометрического уровня. Сочетание таких добавок с наногидросиликатами кальция нижнего и среднего масштабного уровней позволит нанотехнологиям найти широкое применение не только в производстве реакционно-порошковых бетонов, но и в производстве порошково-активированных щебеночных и песчаных бетонов.

Ключевое действие нанометрических кремнеземов заключается не столько в реологической активности, сколько в химической реакции с гидролизной известью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Именно эта химическая реакция способствует образованию дополнительного цементирующего вещества в структуре бетона в виде тоберморита, значительно снижая количество

гелевых и капиллярных пор.

Не менее важным структурным компонентом в бетонах нового поколения является наполнитель микрометрического уровня – молотая горная порода. Это, в частности молотые кварцевые либо кварцесодержащие наполнители – диабаз, сиенит, гранит, базальт, которые тоже реакционно-активны по отношению к  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , но в гораздо меньшей степени чем кремнеземы. Либо это другие дисперсные наполнители – известняк, доломит, которые считаются условно-неактивными, из-за отсутствия протекания химической реакции с известью. Такие порошки из горных молотых пород (каменная мука) относятся к реологически-активным и выполняют в бетонной смеси важнейшую реологическую функцию, которая вытекает из физико-химической механики и реологии дисперсных систем.

Водно-минеральные дисперсные системы с реологически-активными компонентами под действием диспергаторов способны изменять состояние из структуры геля в золь. Происходит это под действием СП и ГП в водно-минеральных дисперсных системах со значительным высвобождением воды. Этот процесс характеризуется нарастающим снижением предела текучести и вязкости системы, сохраняя способность самопроизвольной гравитационной растекаемости.

Такой реологически-активной системы в бетонах старого поколения крайне мало, особенно в малоцементных бетонах, т.к. переходу способна только одна цементно-водная дисперсная суспензия. Поэтому высокодисперсные и тонкозернистые добавки-наполнители называются реологически-активными, в значительной степени усиливающие действие всех видов пластификаторов. Поэтому в сильно пластифицированных бетонных смесях для порошковых и порошково-активированных бетонов реологической матрицей для более макроструктурного компонента является более сложная дисперсия. Необходимо чтобы объем такой матрицы был значительно выше, чем в обычных бетонах. Следовательно, каменную муку целесообразно добавлять к цементу для увеличения как реологического



действия СП на смесь, так и увеличения доли самой реологической матрицы. В этом случае введение каменной муки, практически, сопоставимо увеличению доли цемента, при условии, что водоредуцирующий эффект окажется значительно выше, чем при введении цемента. А согласно эффекту «соразжижения» [97] действие СП эффективнее в матрице с минеральными порошками или смеси их с цементом, чем на чистом цементе. Соответственно результатом введения высокодисперсной каменной муки будет являться значительное снижение количества воды, что повысит плотность и прочность бетона.

Ранними исследованиями профессора, д.т.н. В.И. Калашникова [97] доказано, что добавление к цементу реологически-активных порошков усиливает действие СП, путем увеличения доли тонкодисперсных составляющих. С возрастанием дисперсности порошков повышается редуцирующее действие СП [93]. В этом случае становится возможным при минимальном добавлении воды, вплоть до 5-15 кратного снижения, сохранять критерии гравитационной растекаемости и выравнивания поверхности под действием собственной тяжести. Эти принципы работают в порошковых и порошково-активированных бетонах с улучшением функциональных показателей.

Следовательно, ключевым фактором является добавление каменной муки к цементу, а не замена ею части цемента, как это рекомендовалось ранее в «полиструктурной теории» для экономии портландцемента в низкомарочных бетонах [126, 127, 128]. А учитывая то, что значительно снижая долю цемента невозможно получить высококачественные бетоны с повышенными функциональными показателями, становится совершенно ясным, что на современном этапе стратегия создания высокофункциональных высокопрочных бетонов сводится к стратегии значительного добавления дисперсных реологически-активных по отношению к СП и ГП наполнителей. В свою очередь, выбор горной породы или техногенных отходов в качестве наполнителя должен осуществляться

исходя из двух критериев: реологической активностью и реакционной активности по отношению к продуктам гидратации цемента.

При создании бетонов нового поколения, добавляя в качестве структурных компонентов СП и ГП, микро- и нанокремнеземы, каменную муку или золы, удалось повысить уровень прочности бетонов на сжатие до 130-150 МПа, а в некоторых случаях и до 180-200 МПа без дополнительной тепловой обработки. Однако и бетоны старого поколения, модифицированные высокоэффективными СП и ГП и тонкодисперсными реакционно-химическими пуццоланическими добавками, отличаются повышенными прочностными показателями, но при существенно больших расходах цемента. Поэтому основным критерием, оценивающим эффективность бетонов нового поколения, является не высокая прочность, а удельный расход цемента на единицу прочности (при сжатии  $\mathcal{C}_{R_c}^{уд} = \mathcal{C}/R_c$ , при растяжении при изгибе  $\mathcal{C}_{R_{и}}^{уд} = \mathcal{C}/R_{и}$ , при осевом растяжении  $\mathcal{C}_{R_p}^{уд} = \mathcal{C}/R_p$ ) и обратный этому критерий – удельная прочность на единицу затраченного цемента  $R_{ц}^{уд}$  МПа/R ( $R_{ц}^{уд} = 1/\mathcal{C}_{R}^{уд}$ ).

Так, для четырехкомпонентных бетонов старого поколения этот показатель составлял 10-14 кг/МПа и выше, а в бетонах переходного поколения 6-9 кг/МПа. Для современных реакционно-порошковых и порошково-активированных бетонов это значение находится в пределах 2,5-5 кг/МПа. Поэтому, бетонами нового поколения неправильно считать только высокопрочные и сверхвысокопрочные. К ним относятся все порошково-активированные бетоны с различными границами прочностных показателей: бетоны рядовых марок – 20-60 МПа, бетоны с повышенной прочностью – 60-100 МПа, высокопрочные – 100-150 МПа и сверхвысокопрочные от 150 МПа и более.

Порошково-активированные бетоны нового поколения – это, прежде всего, многопесчаные бетоны, с учетом суммирования молотого и тонкого песка с песком-заполнителем. В таких бетонах не используется в качестве

компонентов щебень, средние и крупные пески, которые являются дорогим и дефицитным природным компонентом для многих регионов. Такие пески можно заменить дроблеными песками, извлекаемыми из отсеков камнедробления горных пород.

Таким образом, бетонами нового поколения являются порошково-активированные многокомпонентные бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности с измененной топологической структурой, при введении оптимизированного содержания реологических и реакционно-активных наполнителей и эффективных СП и ГП.

В отечественной практике практически отсутствуют исследования, посвященные вопросам применения реакционно-порошковых и порошково-активированных бетонов в качестве архитектурно-отделочных и декоративных материалов. В порошковых и порошково-активированных бетонах заложен огромный потенциал для использования их в качестве архитектурно-отделочных бетонов, ведь они по многим критериям превосходят современные технические и экономические требования.

Для таких бетонов очень важно учитывать влияние окружающей среды, в которой они будут эксплуатироваться. Поэтому стоит уделить особое внимание исследованиям в области повышения долговечности и срока эксплуатации архитектурно-декоративных бетонов.

### **1.3. Теоретические предпосылки повышения долговечности и улучшения эстетичных и эксплуатационных характеристик архитектурно-декоративных бетонов**

Архитектурные бетоны эксплуатируются, как правило, в условиях воздействия внешней окружающей среды. Негативное влияние на эстетичный вид и срок службы архитектурных бетонов оказывают знакопеременные температуры, высокая влажность, атмосферные осадки, промышленные газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и т.д.), бактерии, микроорганизмы, пыли, содержащие соли и т.д. Вследствие обозначенных факторов, на поверхности бетонов появляются высолы, выцветы, признаки старения. Эти

факторы крайне негативно влияют не только на эстетичный вид, изменяющийся в процессе эксплуатации, но и на долговечность архитектурных бетонов. При этом понятие долговечности носит субъективный характер и определяется большим числом показателей. Как правило, для архитектурных бетонов понятие долговечности сопоставляют термином «срок службы» или «срок эксплуатации», который определяется эксплуатационным количеством лет без потери прочностных и эстетических показателей. Вместе с тем, понятие долговечности бетона тесно связано совокупностью факторов и свойств таких как: прочность, деформативные свойства, плотность, проницаемость, морозостойкость, коррозионная стойкость и мн.др. [72, 73]

В отечественной практике вопросам повышения долговечности бетонов посвящены работы С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, П.П. Будникова, Ю.М. Бута, В.Д. Глуховского, А.М. Гридчина, Г.И. Горчакова, В.Т. Ерофеева, В.И. Калашникова, К.К. Куатбаева, В.С.Лесовика, В.М. Москвина, Н.И. Макридина, А.П. Прошина, Н.К. Розенталя, В.П. Селяева, М.Т. Солдаткина, С.В. Шестоперова, М.И. Хигеровича, В.Г. Хозина и мн.др.

Для архитектурно-декоративных бетонов, учитывая назначение и условия эксплуатации, одним из основных критериев долговечности является морозостойкость. По Ю.М. Баженову под морозостойкостью бетона следует понимать его способность в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание [72]. Автор выделяет два основных базовых способа повышения морозостойкости:

- уменьшение объема и количества макропор и их проницаемости, например, за счет снижения В/Ц или кольматацией пор гидрофобными составами;

- создание резервных воздушных пор специальными воздухововлекающими добавками, для проникновения в них воды под давлением при ее замерзании.

Для бетонов старого и переходного поколений для получения бетона, отвечающего требованиям по морозостойкости, показатель В/Ц должен быть не более 0,5. В этой связи наиболее интересны труды в отечественной и зарубежной литературе по созданию бетонов нового поколения, в которых, при сохранении подвижности и удобоукладываемости, показатель В/Ц достигает значения 0,18-0,25!!!. Такие бетоны, исходя из своей оптимальной топологической структуры, в частности малой пористости и ее характера, уже при производстве обеспечивают высокий уровень морозостойкости.

В настоящее время в мировой промышленности аспект долговечности при проектировании рецептур бетонной смеси занимает особое место, в первую очередь, большое внимание концентрируют на трех показателях: минимальное содержание цемента, минимальное водоцементное отношение и максимальная прочность на сжатие [76]. Но такой подход характерен лишь для рецептуры бетонов нового поколения. Ведь в бетонах старого и переходного поколений гарантом высокой прочности является большое количество вяжущего вещества. В работах [75, 77] утверждается то, что на показатель долговечности бетона доминирующее влияние оказывает цементное тесто, которое служит главным источником пористости бетона. Согласно авторам, увеличение объема цементного теста, с повышением пористости структуры, понижает долговечность бетона. В этой связи целесообразен опыт разработки бетонов нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности [23, 25, 78].

Учитывая особенности эксплуатации и предъявляемые требования к архитектурно-декоративным бетонам, говоря о долговечности, следует иметь в виду стойкость бетона к воздействию агрессивных сред – коррозионную стойкость. Москвиным В.М. [79] виды коррозии были классифицированы следующим образом: коррозия *первого вида* (процесс, при котором под действием мягких вод, составные части цементного камня растворяются и уносятся из тела бетона); коррозия *второго вида* (процесс, при котором химические вещества, содержащиеся в водах, вступают в реакцию с

составляющими цементного камня); коррозия *третьего вида* (процесс, при котором в порах и капиллярах бетона происходит накопление малорастворимых солей). Кроме того, в отдельную группу относят электро- и биокоррозию.

Сегодня степень агрессивного воздействия окружающих сред на бетон регламентируется специальными государственными стандартами под названием «Единая система защиты от коррозии и старения» (ЕСЗКС), а также строительными нормами и правилами, например СП 28.13330.2012.

Для архитектурно-декоративных бетонов важнейшим свойством является сохранение не только долговечности, но и эстетичного вида на протяжении длительной эксплуатации в условиях агрессивных воздействий окружающей среды. В связи с этим, крайне важно, чтобы поверхность архитектурно-декоративных бетонов была особенно стойкой к коррозии, поэтому необходимо исключать либо минимизировать негативные последствия этих агрессивных воздействий. К таким последствиям можно отнести – попеременное «увлажнение-высушивание», «замораживание-оттаивание», загрязнение, износ, карбонизацию естественное старение, образование выцветов и высолов [28, 35, 39, 40, 41].

Наиболее заметное влияние на долговечность и состояние эстетического восприятия архитектурного бетона оказывают солевые растворы, мигрирующие на поверхность и образующие высолы [40, 41, 42, 43, 80]. Принято считать, что в качестве основного источника появления высолов выступает гидроксид кальция [73, 150, 151, 152]. В своей работе [152] П.И. Боженков приводит данные, говорящие о большом содержании соединений щелочи в составе высолов:  $R_2O$  от 22,7 до 46,28%;  $SO_3$  0,63...24,5%;  $SiO_2$  10,84...19,32%;  $CO_2$  12,65...23,75%;  $Al_2O_3$  1,95...4,52%;  $Fe_2O_3$  1,63...1,81%;  $CaO$  2,64...6,35%. В структуру бетона щелочи попадают с химическими добавками, водой затворения и влагой насыщения в процессе эксплуатации, с заполнителями, а главное цементом. Таким образом, процесс высолообразования зависит от выщелачивания на поверхность гидроксида

кальция, который образуется в момент реакции клинкерных фаз цемента с водой затворения и напрямую связан с применением цемента в качестве вяжущего вещества.

Согласно автору [42], в основе процесса образования солевых выцветов на поверхности лежит химическая реакция карбонизации:



То есть, явление высолообразования связано с тем, что водорастворимый гидроксид кальция, в процессе переноса ионов или перепада концентраций  $Ca^{2+}$ , перемещается к поверхности и оседает на ней при испарении влаги в виде известковых отложений. После чего происходит карбонизация гидроксида кальция, благодаря присоединению углекислого газа, в результате чего образуется труднорастворимый карбонат кальция. На поверхности это проявляется в виде тонких пленок или в виде кристаллических налетов, которые не только ухудшают внешний вид, но и приводят к сокращению срока службы из-за возникновения напряжений при кристаллизации солей в порах бетона.

Для понятия и предотвращения причин образования солевого выцвета необходимо выявить его тип, классификация которых дана в работах [42, 43]. Автор на основе ранее выполненных работ Крессе [44, 45, 46], в которых подробно описываются принципы и механизмы образования солевых выцветов, классифицировал их на три типа согласно периоду образования: первичные, вторичные, третичные.

Кроме того, автор [42, 43] классифицирует высолы по уровню интенсивности проявления их на поверхности. Как уже отмечалось, солевые выцветы состоят из чистых или примесных карбонатов кальция. Для их видимости на поверхности определяющую роль играет то, на каком расстоянии от поверхности образуется карбонат. Согласно этому солевые выцветы по степени видимости можно условно разделить на следующие типы:

- невидимые – кристаллизация гидроксида кальция и его карбонизация проходят на некотором расстоянии от поверхности;

- видимые – кристаллизация гидроксида кальция и его карбонизация проходят на поверхности бетона, которые, в свою очередь, можно разделить на: слабо видимые и сильно видимые.

Невидимые солевые выцветы можно получать путем оперативной сушки, при которой влага испаряется из капиллярных пор ближе к поверхности, в результате чего происходит закупоривание поры внутри тела бетона на некотором расстоянии от поверхности. Это приводит к предотвращению образования первичных выцветов. Но такой процесс приводит и к удалению влаги в приповерхностной зоне, которая участвует в гидратации цемента. В результате этого, возникает увеличение объема поверхностной эрозии, что приводит к риску образования вторичных и третичных выцветов и значительно понижает стойкость к агрессивным средам. Поэтому, идеальным условием является карбонизация строго на границе с поверхностью, когда капиллярные поры закупориваются, не давая возможности образования более сильных выцветов в процессе эксплуатации, в тоже время они трудно заметны невооруженным глазом. Гораздо хуже, когда карбонизация происходит непосредственно на поверхности бетона, образуя тонкую пленку карбонатов интенсивной видимости.

Таким образом, высолообразование крайне негативно влияет на визуальный эстетический вид декоративных бетонов. Поэтому проблема образования солевых выцветов очень актуальна и многогранна при создании архитектурно-декоративных бетонов. Следует учитывать огромное количество факторов для предотвращения этого процесса, в первую очередь, следует снижать количество растворимых солей в материалах, ограничивать перенос влаги внутри бетона, обеспечить бетон водоотталкивающими свойствами. В настоящее время для решения этой проблемы используются следующие мероприятия [47, 72, 73, 147, 148, 149].: снижение концентрации гидроксида кальция в бетонной смеси путем введения реакционно-активных



компонентов, связывающих свободную гидролизную известь; пропитка поверхности силиконами и эфирами кремниевой кислоты; пропитка поверхности некоторыми органическими соединениями; нанесение защитных покрытий на поверхность бетона; повышение плотности и непроницаемости структуры бетонов и растворов за счет применения пластифицирующих и полимерных добавок; введение в состав воздухововлекающих и газообразующих добавок; кальматация пор и капилляров путем поверхностной и объемной гидрофобизации.

В настоящей диссертационной работе предлагаются в качестве архитектурно-декоративных бетонов – порошково-активированные высокопрочные бетоны нового поколения, которые должны обладать оптимальной топологической структурой, иметь высокую прочность на сжатие (100-150 МПа), иметь низкий показатель водопоглощения (0,8-1,5%) по массе и высокую морозостойкость ( $F > 1000$ ). В соответствии с этим формируется рабочая гипотеза: *если получить бетон с чрезвычайно низким водопоглощением, не превышающим 0,8-1,5% по массе, с указанной выше прочностью, 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.*

Кроме того, при выборе метода защиты от коррозии нами принималось во внимание понятие температурно-влажностного градиента в теле бетона. В отличие от обработки поверхности паронепроницаемыми составами (краски, эмульсии и т.д.), гидрофобизация позволяет избежать накопления влаги в теле бетона и уменьшить обмен влаги бетона с окружающей средой.

Стоит отметить, что гидрофобизаторы были синтезированы в 40-е годы XX века. Большинство органических веществ, имеющих неполярные молекулы или большие неполярные участки в молекулах, обладают свойством гидрофобности. Согласно Европейскому стандарту [129],

гидрофобизаторы – это вещества, которые обеспечивают понижение капиллярного водонасыщения более чем на 50%. По эффективности снижения водопоглощения они делятся на три основных группы, согласно ГОСТ 24211-2003 [131].

В отечественной практике гидрофобизация материалов получила широкое применение в 80-х годах, с использованием кремнийорганических соединений (КОС) [130]. Применение КОС впервые в СССР было осуществлено при производстве железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях Баренцева моря. Этот опыт в дальнейшем позволил внедрить модифицированные бетоны при сооружении большого числа гидротехнических сооружений и сооружений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера [132, 133, 134]. В литературных источниках попадаются факты применения гидрофобных добавок с 1960-х годов, являющихся синтетическими жирными кислотами (СЖК), например стеарат или гальмитинат кальция, так называемые порошковые тонкодисперсные гидрофобизаторы [142, 143].

В отечественной и зарубежной практике при обработке бетонных поверхностей и поверхностей природных каменных материалов широкое применение нашли кремнийорганические жидкости: этилсиликонат и метилсиликонат натрия, так называемые ГКЖ-10 и ГКЖ-11 [129, 131, 133, 144, 145, 146].

Последнее время гидрофобные составы все чаще используют для защиты и повышения атмосферостойкости поверхности фасадов уникальных зданий и сооружений, памятников истории и архитектуры [81, 82, 129].

Для экономической и технологической целесообразности, в качестве основного метода гидрофобизации применяется пропитка поверхности уже выдержанного бетона гидрофобизирующими жидкостями [135, 136, 137]. Чаще всего ими являются вязкие полиэфирные композиции, которые относительно мало испаряются в процессе полимеризации и образуют на поверхности плотную и ровную пленку.

Обобщая литературные данные по гидрофобизации, становится ясно что, существует огромное количество модификаторов. При их выборе следует внимательно относиться к ряду факторов и показателей, главными из которых являются время сохранения гидрофобных свойств и эффективность гидрофобизирующих добавок, определяемой коэффициентом длительной водостойкости.

Учитывая условия эксплуатации, для архитектурно-декоративных бетонов важным критерием оценки является состояние наружной поверхности. В процессе эксплуатации необходимым фактором является не только высокий показатель долговечности и сохранение однородной структуры наружной поверхности, но и ее первоначального цвета, т.к. именно сочетание архитектурно-планировочных элементов с уникальной окраской создает неповторимый вид.

Существует несколько способов формирования цвета поверхности архитектурного бетона, одним из которых является введение окрашивающего пигмента в состав бетонной смеси. Цветной бетон получил широкое распространение благодаря возможности получения изделий абсолютно любой цветовой гаммы, что является очень важным эстетическим аспектом при строительстве. Эстетические характеристики цветного бетона, во многом зависят от качества пигментов, применяемых для окрашивания смеси. Пигменты должны отвечать особым требованиям качества и устойчивости цвета, которые регламентируются европейским стандартом EN 12878 [29]. Кроме того, пигменты должны отвечать требованиям по высокой степени устойчивости к щелочам, т.к. при гидротации цемента при образовании гидроксида кальция возникает сильная щелочная реакция.

Наиболее эффективными считаются природные или искусственные неорганические и некоторые органические пигменты. В отечественной и зарубежной практике широкое применение получили искусственные железистоокислые и хромоокисные пигменты марок Bayferox, Colortherm и Bayoxide. [30]

Как правило, введение пигментов в состав понижает прочность бетонной смеси. Об этом свидетельствует множество публикаций и научных трудов [31, 32, 34]. Так, в работе [32] это негативное явление объясняется повышением водопотребности бетонной смеси, вследствие высокой дисперсности красителей. Согласно автору, введение пигмента несет в себе двойное действие: во-первых, выполняет функции микронаполнителя, уплотняя структуру, а во-вторых, являясь условно неактивным компонентом, снижает прочность. Но стоит отметить, что эти и другие работы, посвященные данной тематике, выполнены на бетонах старого или переходного поколений. Согласно вышеуказанным принципам создания порошково-активированных бетонов нового поколения, введение пигментов потенциально может не только не снижать прочностные характеристики, но и незначительно повышать их, являясь одним из реологически-активных микронаполнителей, увеличивающих объем дисперсной матрицы. В связи с этим, на сегодняшний момент в области цветных архитектурных бетонов одной из актуальнейших задач является изучение влияния пигментов различного происхождения на свойства порошковых и порошково-активированных бетонов нового поколения.

При выборе пигмента следует учитывать, что его качество оказывает большое влияние на формирование и сохранение однородного цвета архитектурного бетона. Тем не менее, существует еще ряд значительных факторов определяющих формирование цвета [30, 32, 35, 36, 37, 38]: правильное дозирование пигментов, выбор вяжущего вещества, выбор заполнителя, соблюдение оптимального водоцементного отношения (В/Ц), последовательность операций приготовления состава, выбор опалубки или формы и разделительных средств.

Таким образом, уже при формировании цвета и фактуры поверхности архитектурного бетона, следует учитывать огромное количество, влияющих на это факторов.

При создании архитектурно-отделочных бетонов существует огромное количество факторов, влияющих на долговечность и эстетичный вид, как при формировании цвета и фактуры поверхности, так и при дальнейшей эксплуатации бетона. Необходимо не только учитывать, но и предотвращать последствия воздействий этих факторов. Стоит отметить, что порошковые и порошково-активированные бетоны нового поколения благодаря рационально подобранному многокомпонентному составу уже на этапе формирования позволяют исключить ряд негативных факторов, влияющих на долговечность и цветоустойчивость. А учитывая уникальные свойства таких бетонов (повышенная плотность, морозостойкость, коррозионная стойкость и т.д.) с высокой долей вероятности можно констатировать, что применение их в качестве архитектурно-отделочных в значительной степени позволят решить проблему повышения долговечности и срока службы декоративных бетонов без потери первоначальных эстетичных показателей.

Анализ литературных данных показал, что проблема повышения долговечности и улучшения эстетичных и эксплуатационных характеристик архитектурно-отделочных бетонов очень актуальна и на сегодняшний день. Все исследования по решению этой проблемы проводились применительно к бетонам старого и переходного поколений, и не затрагивали бетоны нового поколения, в том числе порошковые и порошково-активированные. Поэтому возможности создания эффективных экономичных высокопрочных архитектурно-отделочных бетонов нового поколения с использованием отходов камнедробления с повышенным сроком службы посвящена данная диссертационная работа.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Характеристика сырьевых материалов

В настоящих диссертационных исследованиях по разработке составов декоративно-архитектурных порошковых и порошково-активированных бетонов для обоснования обобщающих основных выводов и результатов использовалось большое количество сырьевых материалов. Это позволило сделать обобщающие выводы по целесообразности использования в качестве основных сырьевых материалов отходов камнедробления, а также их взаимодействию с рядом отечественных и зарубежных цементов и пластифицирующих добавок.

Характеристики, свойства, химический и минералогический состав используемых цементов приведены в табл. 2.1. В таблице маркировка цементов приведена в соответствии с Межгосударственным Евразийским ГОСТ 31108-2003 «Цементы общестроительные. Технические условия». Характеристики цементов были определены по стандартным методикам ГОСТ 310.1-76 (1992) «Цементы. Методы испытаний. Общие положения»; ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема»; ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».

Таблица 2.1

Характеристики и свойства цементов

Наименование цемента изготовителя	Суд., м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Сроки схватывания, час-мин.		Прочность через 28 сут, МПа		Минералогический состав, %			
			начало	конец	R <sub>сж</sub> <sup>28</sup>	R <sub>изг</sub> <sup>28</sup>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), Бельгия	408	26,5	1-40	3-22	72	8,7	76	16	5-6	0,78
ПЦ Цем I 52,5 Н (белый), Holcim Rus Россия	455	27,9	1-25	2-52	57	7,7	64	16	13	2
ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), Alborg Weit, Египет	425	26,4	1-54	3-18	67	8,5	78,7	7,1	5,37	0,49
ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), Alborg Weit, Дания	389	26,0	1-43	3-10	75	9,2	77	15	4-5	1
ЦЕМ I 42,5Н, ОАО «Красноярский цемент»	320	25,2	2-35	4-50	52,5	6,3	55-60	14-18	7-8	14-16
ПЦ I 42,5 Д0 ОАО «Вольскцемент»	330	24,5	2-20	3-20	53	6,2	63	16	4,8	14

При выборе белых цементов для цветных архитектурно-декоративных бетонов одним из критериев выбора было значение коэффициента отражения света (белизна).

- ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), Alborg Weit, Дания -85-90%,
- ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), Alborg Weit, Египет - 87,4%,
- ПЦ Цем I 52,5 Н (белый), Holcim Rus, Россия - 82-84%

***В качестве реологически-активного дисперсного наполнителя*** использовалась каменная мука, приготовленная при помоле в лабораторной шаровой мельнице. Удельная поверхность ее после помола определялась с помощью прибора ПСХ-9. Для приготовления каменной муки использовались следующие горные породы:

- гранитная каменная мука, г. Павловск,  $S_{уд}=3700 \text{ см}^2/\text{г}$ ;
- гранитная каменная мука, г. Житомир,  $S_{уд}=3750 \text{ см}^2/\text{г}$
- известняковая мука г. Тольятти,  $S_{уд}=4800 \text{ см}^2/\text{г}$ ;
- известняковая мука, г. Стерлитамак,  $S_{уд}=3400 \text{ см}^2/\text{г}$ ;
- мраморная мука,  $S_{уд}=3800 \text{ см}^2/\text{г}$ ;
- микрокварц, ЛГОК,  $S_{уд}=3400 \text{ см}^2/\text{г}$ .

***В качестве тонкозернистых наполнителей и песка-заполнителя*** использовали отсеvy дробления известняка, мрамора, гранита рассеянные на фракции 0,16-0,63 мм, 0,63-2,5 мм или 0,63-5 мм соответственно.

Минеральное сырье предварительно высушивалось до постоянной массы при температуре  $t=100\pm 5^\circ\text{C}$ . Горные породы, поступившие для испытаний в виде кусков, дробились в щековой дробилке и рассеивались (как и отсеvy камнедробления) на фракции на стандартных ситах по ГОСТ 6613-86. Отсевы, прошедшие сито 0,16 мм, размалывались в лабораторной шаровой мельнице до заданной удельной поверхности. Полученная мука использовалась в качестве реологически-активной минеральной добавки. Отобранные на ситах более крупные фракции использовались в качестве тонкозернистого песка и песка-заполнителя.

**В качестве пластифицирующих добавок использовали:**

• **гиперпластификатор (ГП) серии «Melflux» - Melflux 5581F** на основе поликарбоксилатных эфиров (компания Degussa Constraction Polymers, SKW Trostberg, Германия) по строению – привитые сополимеры. Отличаются тем, что диспергирование (дефлокуляция, разрушение агломератов, пластификация) происходит по электростерическому принципу (электростатическое отталкивание + стерическое препятствие сближению мелких частиц).

Таблица 2.2

Характеристика гиперпластификатора Melflux 5581 F

Внешний вид, цвет	Порошок, цвет от желтоватого до коричневого
Потери при высушивании, масс. %	max. 2,0
Насыпная плотность, кг/м <sup>2</sup>	400-600
Реакция – рН 20%-ого раствора t=20°C	6,5-8,5
Рекомендуемая дозировка по отношению к массе связующего, %	0,05-1,0

• **суперпластификатор серии «Melment F10»** – сульфонируемый порошок продукт поликонденсации на основе меламин, полученный методом распылительной сушки. Суперпластификатор Melment F10 оптимизирован для пластификации и уменьшения расхода воды для смесей на основе цемента и гипса. Производитель: BASF Constraction Polymers (Trostberg, Германия).

Таблица 2.3

Характеристика гиперпластификатора Melment F10

Внешний вид, цвет	Порошок, цвет белый
Потери при высушивании, масс. %	max. 4,0
Насыпная плотность, г/л	450-750
Реакция – рН 20%-ого раствора t=20°C	9,0-11,4
Рекомендуемая дозировка по отношению к массе связующего, %	0,5-1,0

**комплексная добавка – гиперпластификатор Хидетал-ГП-9** (Производитель: ООО «УК «ГП «СКТ-Стандарт», г. Коломна). Отечественная пластифицирующая добавка последнего поколения поликарбоксилатного состава. Важное свойство ее в бетоне – длительная



сохраняемость подвижности бетонной смеси, что особенно важно при перевозке ее в условиях крупных городов и на дальние расстояния.

В табл. 2.4 дана рекламная информация, противоречивая, по-нашему мнению, по повышению подвижности: с одной стороны подвижность повышается до П5, т.е до осадки конуса 20 см, с другой –осадка конуса указана 27 см и расплыв конуса 63 см. Последние значения соответствуют самоуплотняющейся бетонной смеси, соответствующей американским техническим документам для СУБ SF-2. Современные отечественные бетонные смеси старого поколения (состава: цемент-песок-щебень-вода) с расходом цемента 300 кг/м<sup>3</sup> с самыми эффективными пластификаторами при осадке конуса 27 см являются сильно расслаивающимися и не пригодны к формированию изделий.

Таблица 2.4

Характеристика гиперпластификатора Хидетал-ГП-9γ (гамма) модификация «А» (ТУ 5745-010-57330160-08)

Дозировка (по жидкому веществу)	0,6-2%
Прирост прочности без ТВО по сравнению с контрольным	В 1-е сутки – до 50%, в 28-е – до 200%
Уменьшение расхода цемента при сохранении проектных прочностных характеристик во все сроки твердения	До 30%
Морозостойкость	$F \geq 300$
Водонепроницаемость	$W \geq 16$
Повышение подвижности бетонной смеси	От П1 до П5 без снижения прочности изделия, осадка конуса макс. 27 см, расплыв конуса макс. 63 см
Сокращение расхода воды в бетонной смеси	До 35%

**В качестве окрашивающих компонентов-добавок** для архитектурно-декоративных бетонов использовали следующие пигменты и красители:

- **ZnO оксид цинка.** Цвет: белый.

бесцветный кристаллический порошок, нерастворимый в воде, желтеющий при нагревании и сублимирующийся при  $t=1800$  °С.

- **TiO<sub>2</sub> диоксид титана.** Цвет: белый. Это пигмент белого цвета, не растворимый в воде и кислотах. По укрывистости является лучшим из всех

других видов белил, обладает высокой атмосферо-, кислото-, щелоче- и температуростойкостью. Для изучения влияния диоксида титана на реотехнологические свойства бетонной смеси, а также разбеливающей способности и фотокаталитической активности, данный вид пигмента использовался двух торговых марок производства Украины и Китая. Технические характеристики представлены в табл. 2.5

Таблица 2.5

Технические характеристики  $TiO_2$

Наименование пигмента, Производитель		$TiO_2$ , Украина	$TiO_2$ , Китай
СВОЙСТВА	Содержание $TiO_2$ , %	93	95
	Белизна, у.е	94	97
	Диспергируемость, мкм	14	7
	Маслоемкость, г/100г	20	18
УСТОЙЧИВОСТЬ	к свету, балл	8	8
	к температуре, °С	180	180
	к воде, у.е	5	5
	к льняному маслу, у.е	5	5
	к кислотам, у.е	5	5
	к щелочам, у.е	5	5

-  $Cr_2O_3$  окись хрома. Цвет: изумрудная зелень. Окись хрома – чрезвычайно светостойкий пигмент, не растворимый в воде, кислотах и щелочах (табл. 2.6). Срок хранения пигментов оксида хрома не ограничен.

Таблица 2.6

Технические характеристики  $Cr_2O_3$

Наименование пигмента, Производитель		$Cr_2O_3$ , Россия
СВОЙСТВА	Колор-индекс	P.G. 17
	Интенсивность, %	100
	Маслоемкость, г/100г	20
УСТОЙЧИВОСТЬ	к свету, балл	8
	к температуре, °С	700
	к воде, у.е	5
	к льняному маслу, у.е	5
	к кислотам, у.е	5
	к щелочам, у.е	5

- *Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> оксид железа*. Цвет: черный, марка S 330. Производитель: Китай, компания «SHANGHAI YIPIN INTERNATIONAL PIGMENTS CO, LTD»  
 Данный пигмент имеет отличную кроющую способность и интенсивность цвета. Выдерживает воздействие щелочей и слабых кислот, но может растворяться в сильных кислотах. При создании цветных бетонов рекомендуемая производителем дозировка составляет 3-5% от массы цемента. Свойства пигмента представлены в табл. 2.7

Таблица 2.7

Технические характеристики пигмента черного S 330

Наименование пигмента, Производитель		Пигмент черный S 330, Китай
свойства	Содержание Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	94
	Водорастворимые вещества, %	1,0
	Значение р-Н	5-8
	Отклонение цветности, %	1,0
	Красящая способность	95-105
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	4,5
	к льняному маслу, у.е	5
	к кислотам, у.е	5
	к щелочам, у.е	5
устойчивость	к свету, балл	6-7
	к температуре, °С	100
	к воде, у.е	5
	к щелочам, у.е	4-5
	к кислотам, у.е	5

Кроме этого, использовались оксиды железа - *Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* (трехвалентного). Красного и желтого цвета. Производитель: Германия (торговая марка Bayferrox).

Это цветные железистоокисные пигменты, одни из самых распространенных типов неорганических пигментов. Оксиды железа долговечны, экономичны, не оказывают значительного влияния на экологию, безопасны для здоровья.

В качестве органического окрашивающего компонента использовали *краситель фталоцианиновый голубой*.

В исследованиях по повышению водостойкости архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов *применяли гидрофобизаторы* последнего поколения. В качестве гидрофобизирующих добавок использовали порошковый гидрофобизатор – стеарат цинка, а также жидкообразный гидрофобизатор – «ПЕНТА-824». При выборе металлоорганических гидрофобизирующих модификатора были проанализированы 3 вида гидрофобизаторов (табл.2.8). Из них был выбран стеарат цинка, имеющий максимальную дисперсность, и согласно нашим исследованиям по влиянию его на реотехнологические показатели порошково-активированной бетонной смеси и исследованиям степени гидрофобизации минерально-шлаковых бетонов [28], это вид порошкового гидрофобизатора оказался наиболее эффективным.

- *металлоорганический гидрофобизатор - стеарат цинка ( $C_{18}H_{35}O_2$ )<sub>2</sub> Zn* – фирмы «Baerlocher GmbH», в РФ реализуется ЗАО «ЕвроХим-1». высокоэффективный порошкообразный нерастворимый в воде и щелочах металлоорганический гидрофобный агент с высокой удельной поверхностью.

- В качестве жидкообразного пропитывающего гидрофобизатора, основываясь на исследованиях [28] была выбрана - *пропитывающая жидкость - «Пента-824»* (г. Москва). Она представляет собой раствор алкилгидридсилоксана в органическом растворителе и придает водоотталкивающие свойства материалам, без ухудшения их внешнего вида, газо- и паропроницаемости. По исследованиям производителей водоотталкивающий эффект обработанной поверхности сохраняется в течение 10 лет. Достоинствами гидрофобизатора Пента-824 являются: экономичность, простота в использовании, высокая стойкость к воздействию климатических факторов (замораживание, оттаивание, УФ-облучение и т.п.), хорошая способность к окрашиванию лаками и эмалями на органической основе, сохранение первоначального вида и цвета изделия.

Таблица 2.8

## Основные физические и химические свойства гидрофобизирующих металлоорганических добавок

№ п/п	Физические и химические свойства	Стеараты металлов:		
		цинка	кальция	магния
1	Химическая формула	$(C_{18}H_{35}O_2)_2Zn$	$(C_{18}H_{35}O_2)_2Ca$	$(C_{18}H_{35}O_2)_2Mg$
2	Внешний вид	порошок белого цвета	порошок белого цвета	порошок белого цвета
3	Молекулярная масса, г/моль	623,33	607,03	591,27
4	Температура плавления, °С	130	179	88,5
5	Содержание воды, (%), max	1,0	3,0	5,0
6	Содержание металла, (%), max	ZnO 10,4-11,2	CaO 7,3-7,9	MgO 4,8
7	Содержание свободных жирных кислот, (% от стеариновой кислоты)	0,4-1,5	1,0	2,0
8	Содержание золы, (% от массы стеарата)	12,5-14,5	9,6-10,5	8,0
9	Содержание хлоридов, таких как «Cl», (%), max	–	–	0,1
10	Содержание сульфатов, таких как «SO <sub>4</sub> », (%), max	0,6		0,5
11	Растворимость	Не растворим в воде, эфире; мало растворим в бензоле, скипидаре, горячем минеральном масле	Не растворим в воде; растворим в горячем спирте, эфирах	Не растворим в воде, эфире; растворим в бензоле, скипидаре, горячем минеральном масле
12	Потери при прокаливании, (%), max	3,5	4,0	6,0
13	Насыпная плотность (кг/л)	0,16-0,30	0,2-0,25	0,15-0,3
14	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	3,6	1,9	2,9
15	Содержание свободных оснований, как NaOH (%), max	1,0	0,05	0,07

- *Для разбавления пропитывающей жидкости* «Пента-824», согласно рекомендациям производителя, использовали растворитель «Уайт-Спирит. Нефрас С4 155-200». При использовании растворителя применяли индивидуальные средства защиты.

*Для затворения бетонных смесей* применяли воду хозяйственно-питьевого водопровода, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 23732-79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

Бетонные и растворные смеси готовились по стандартным методикам. Растворы пластификаторов дозировались с водой затворения по объему из пересчета на содержание сухого вещества от массы цемента. Приготовленные суспензии цемента и каменной муки были саморастекающимися и самоуплотняющимися. Бетонные смеси изготавливались, как правило, самоуплотняющимися. В редких случаях, с целью определения эффективности пластифицирующих добавок в бетонных смесях, они изготавливались с различной удобоукладываемостью. Последние уплотнялись на лабораторной виброплощадке с амплитудой колебаний 0,5 мм и частотой 3000 кол./мин.

## **2.2. Методы исследований, приборы и оборудование**

Физико-химические свойства исходных компонентов, реологические характеристики цементных и цементно-минеральных суспензий и архитектурно-декоративных бетонных смесей и физико-технические свойства бетонов оценивали в соответствии со стандартами и ГОСТами, а также методиками, описанными в литературных источниках. Кроме того, использовались и собственно разработанные методики.

Используемые горные породы подвергались предварительному дроблению в лабораторной щековой дробилке и помолу в лабораторных шаровых мельницах марок МЛ 40, М 20 и К 6 ёмкостью 40, 20 и 2 литра до определенной удельной поверхности для каждой горной породы для увеличения реологической активности их в смеси с цементом. Общая

дисперсность продуктов помола оценивалась по величине удельной поверхности, которая определялась на приборах ПСХ-9 и ПСХ-2.

Взвешивание тонкоизмельченных горных пород, цемента, высокодисперсных пигментов производилось на электронных лабораторных весах отечественного производства марки «Масса-К ВК-1500» с точностью измерения до 0,02 г.

Одно из условий получения саморастекающихся бетонных смесей – использование суперпластификаторов и гиперпластификаторов нового поколения.

Дисперсные горные породы в суспензиях с суперпластификатором должны были обеспечивать регламентируемый расплыв диаметром 28-35 см их из конуса Хагерманна. При этом определялся и расплыв водных суспензий без суперпластификаторов. Водоредуцирующий эффект, определялся по формуле:

$$B_{\text{эф}} = \frac{(B/T)_H}{(B/T)_П} \quad (2.1)$$

где  $(B/T)_H$  и  $(B/T)_П$  - водотвердое отношение непластифицированной и пластифицированной бетонных смесей при одинаковых консистенциях их.

*Водоредуцирующий эффект* при введении добавок в цементные суспензии предварительно определялся также по экспресс-методике, разработанной на кафедре «ТСМиД», по диаметру расплыва суспензии, определяемого с помощью видоизмененного минивискозиметра (внутренний диаметр цилиндра 10 мм, высота 40 мм). При этом также определялось водоцементное или водотвердое отношение контрольной непластифицированной суспензии и суспензии с ГП, при которых достигался нормированный расплыв, равный 28-30 мм.

Для повышения водоотталкивающих свойств архитектурно-декоративных бетонов с порошкообразной гидрофобной добавкой – стеаратом цинка, при смешивании его с дисперсными компонентами бетонной смеси использовали шаровую мельницу с керамическими шарами.

Смесь перемешивалась в течении 10 минут для однородного распределения частиц гидрофобизатора между частицами дисперсных компонентов.

Бетонные смеси для архитектурно-декоративных бетонов приготавливались по двухстадийной технологии в высокоскоростном смесителе кафедры «ТСМиД» с числом оборотов в основном диапазоне от 300 до 600 об/мин. На первом этапе, путем однородного перемешивания цемента и каменной муки, приготавливалась водно-дисперсная суспензия, пластифицированная ГП Melflux 5581F с дозировкой 1% от массы цемента, в высокоскоростном смесителе. На втором этапе в полученную водно-дисперсную систему добавлялся тонкий песок фр.0,16-0,63 мм, который однородно перемешивался, после чего вводили песок заполнитель фр.0,63-2,5 мм на более низких оборотах смесителя. В/Ц подбиралось с учетом получения степени растекания бетонной смеси, соответствующей расплыву конуса Хегерманна 30-34 см. Процедура смешения компонентов и продолжительность перемешивания варьировалась в зависимости от вида используемых компонентов, высокодисперсных добавок, пигментов и вида бетонов.

*Прочность архитектурно-декоративного бетона* определяли по методике ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Для формования использовались формы размерами 40×40×160 мм и 100×100×100 мм. После формования образцы твердели в герметичных условиях в полиэтиленовых мешках при относительной влажности воздуха 95-98 % в течение суток, затем распалубливались, измерялись, взвешивались. По результатам точного обмера и взвешивания определялась плотность бетона в сыром состоянии. Затем образцы дополнительно твердели в тех же условиях 27 суток и подготавливались к испытанию.

Определение *прочности при сжатии* архитектурно-декоративного бетона осуществляли через 1, 7 и 28 суток на образцах-кубах с ребром 100 мм на прессе марки «Technotest» KD 300/R производства Италии (рис. 2.1).



Испытания на растяжение при изгибе осуществляли на балочках  $40 \times 40 \times 160$  мм на машине МИИ-100.



Рис. 2.1 Вид пресса «Tecnotest» при испытании образца окрашенного порошково-активированного песчаного бетона

*Плотность бетона* определяли по стандартной методике ГОСТ 12730.1-78 «Методы определения плотности».

*Усадочные деформации* бетонов и *деформации набухания* измеряли в соответствии ГОСТ 24544-81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести» на образцах-призмах размером  $40 \times 40 \times 160$  мм и призмах базового размера  $100 \times 100 \times 400$  мм. При формировании образцов на внутренние торцевые поверхности форм закрепляли реперы из нержавеющей стали с анкерующими отгибами, после чего формы заливали самоуплотняющейся порошково-активированной бетонной смесью. Деформации усадки фиксировали в течении 75 дней при колебаниях относительной влажности воздуха в диапазоне 55-60%, а значения деформации набухания измеряли в течение 75 суток после выдерживания образцов в воде. Завершение испытаний в соответствии с ГОСТ определялись по минимальному приросту усадочных деформаций, не превышающему точность измерения. По результатам испытаний

вычислялись средние значения абсолютных деформаций для каждого образца. По средним абсолютным значениям деформаций определялись относительные величины деформаций  $\varepsilon_I(t)$ :

$$\varepsilon_I(t) = \frac{\Delta l_I(t)}{l_I}, \quad (2.2)$$

где  $l_I$  – база измерения деформаций, мм;

$\Delta l_I(t)$  – средние значения абсолютных деформации, мм.

Одновременно с определением усадки взвешиванием образцов фиксировалась потеря воды.

*Водопоглощение* архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона определяли по ГОСТ 12730.3-78 – «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Согласно методике определения водопоглощения испытания следует проводить на образцах-кубах с размером ребра 100 мм. Мы определили зависимость водопоглощения от масштабного фактора для порошково-активированного песчаного бетона и экспериментальным путем получили коэффициенты пересчета значений водопоглощения с образцов-балочек размерами 40×40×160 мм на образцы-кубы 100×100×100 мм (глава 4, п.4.3). Поэтому для определения водопоглощения нами испытывались образцы-балочки 40×40×160 мм и образцы-кубы с размером ребра 100 мм. Водопоглощение определялось также и на гидрофобизированных образцах.

Для определения *водопоглощения верхней поверхности* архитектурно-декоративного бетона, была разработана собственная методика определения водопоглощения лицевой поверхности плитки, в том числе гидрофобизированной. Метод заключается в следующем: плитку надежно изолировали пластилином по периферии со всех сторон. На лицевую поверхность изолированной по бокам плитки, в образованную «чашу», заливали воду и определяли время впитывания воды в поверхность. Для сравнения параллельно проводили аналогичный эксперимент на различных поверхностях одинакового состава. Таким методом определяли водопоглощение по массе лицевой поверхности при кратковременном

воздействии воды (в природе дождь) через 5 минут, 15 минут, 30 минут, 60 минут.

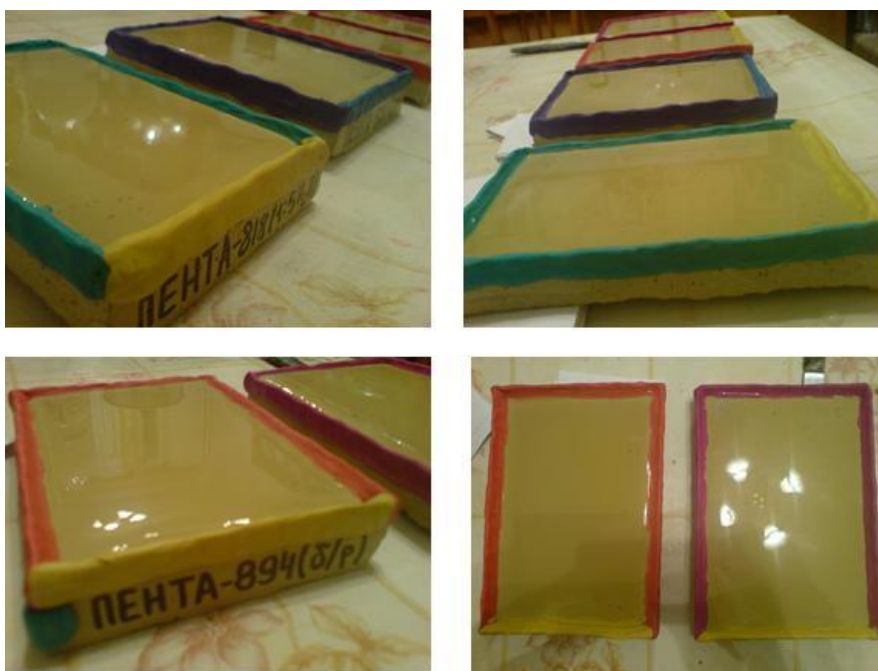


Рис. 2.2 Методика определения водопоглощения лицевой поверхности цветной декоративной плитки, пропитанной гидрофобными жидкостями «ПЕНТА»

*Капиллярное водопоглощение* архитектурно-отделочного бетона контрольного состава и гидрофобизированного определяли в соответствии с EN 1015–18:2002 на балочках 40×40×160 мм, установленных в воду вертикально на глубину 7 мм. Во время определения капиллярного водонасыщения образцов архитектурно-декоративного бетона, в том числе гидрофобизированного и окрашенного, наблюдали за высотой поднятия жидкости в течение 7 суток. Параллельно фиксировалось наличие или отсутствие процесса высолообразования.

*Для формирования поверхности имитирующей натуральный гранит, обнажая зернистый заполнитель архитектурно-декоративного бетона, использовали метод травления соляной кислотой. Операция травления осуществлялась путем обработки поверхности кистью, с последующим смыванием образующегося хлорида кальция водой. При работе с кислотами использовали индивидуальные средства защиты.*

Определение *морозостойкости* проводили согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по 3 ускоренной методике при насыщении образцов 5%-м водным раствором хлорида натрия. Испытания осуществляли в лаборатории производственного предприятия ООО «Пензенское управление строительства» в морозильной камере отечественного производства типа КТХ-14 при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$  по режиму: 8 часов замораживания – 16 часов оттаивания.

*Микроскопические исследования структуры* пластифицированного порошково-активированного песчаного бетона, в том числе окрашенного, выполнялись на микроскопе Digital Blue QX3.

*Рентгенофазовое исследование* взаимодействия  $\text{TiO}_2$  с продуктами гидратации цемента выполнялось на автоматизированном дифрактометре «Empyrean» компании PANalytical (Нидерланды) с излучением  $\text{Cu}_{K\alpha 1,2}$  с применением твердотельного трехмерного детектора PIXcel<sup>3D</sup> и Ni-фильтра. Съемка проводилась с автоматической щелью расходимости для лучшей видимости линий на больших углах.

### **ГЛАВА 3. РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ И ИХ КОМБИНАЦИЙ**

Архитектурно-декоративные бетоны в большем своем объеме являются песчаными, а с учетом последних достижений – порошковыми, реакционно-порошковыми и порошково-активированными песчаными. Поэтому для них, так же, как и для всех бетонов нового поколения, основой получения высоких реологических свойств и качественных показателей является включение в их состав дисперсных наполнителей. Они могут быть как реологически-активными, так и реакционно-активными. Кроме того, цветные архитектурно-декоративные бетоны содержат в своем составе пигменты, которые по уровню дисперсности (2000-5000 кг/м<sup>2</sup>) не уступают или соответствуют микрокремнеземам или дегитратированным каолинам. В них содержится некоторое количество частиц, обычно 20-40% верхнего нанометрического уровня, с размерами 200-400 нанометров. В отличие от реакционно-активных добавок, пигменты вводятся в различных количествах в зависимости от требуемой глубины окраски, но не более 5-10% от массы цемента. Поэтому изучение реотехнологических показателей порошковых бетонных смесей с пигментами является важной технологической задачей, когда преследуется цель получения декоративных изделий различных форм с глянцевой, матовой или рельефной поверхностями.

Задачей данного этапа исследования являлась оценка реотехнологических свойств белых цементов, а для сравнения осуществлялось исследование серых цементов на предмет их разжижаемости с помощью различных суперпластификаторов. Кроме того, были изучены не только реотехнологические свойства цементов, но и реотехнологические свойства дисперсных наполнителей и пигментов. Реотехнологические свойства изучались как на чистых цементных суспензиях, так и в бинарных и тройных системах с целью выявления синергетического или антогонистического действия одних компонентов на другие в суспензиях с суперпластификаторами.

### **3.1 Методические особенности изучения реотехнологических свойств порошковых и порошково-активированных бетонов.**

Под реотехнологическими свойствами мы понимаем инженерные свойства бетонных смесей, важные для контроля технологии производства. Эти свойства не предусматривают определение классических показателей реологии: пластической вязкости, предельного напряжения-сдвига, периода релаксации и ретардации напряжений и т.п. В производственной практике изготовления бетонных смесей наиболее важными являются инженерные реологические свойства, значения которых контролируются заводской лабораторией и дают представления о консистенции, удобоукладываемости и о течении бетонных смесей.

В порошково-активированных бетонных смесях нового поколения как в реологической системе обеспечивается независимость движения тонких и грубых частиц в водной суспензии. Большое влияние на реологические свойства системы в бетонных смесях старого поколения оказывает взаимодействие частиц друг с другом, затрудняя их свободное передвижение слоями движущейся жидкости. Чтобы более полно представить концепцию формирования топологической структуры самоуплотняющихся порошковых, реакционно-порошковых и порошково-активированных бетонов и понять принцип «высокой» реологии при низкой водопотребности бетонных смесей, следует обратиться к понятию «условная реологическая матрица». Классификация реологических матриц по дисперсно-зернистому масштабному уровню подробно представлена в работе [139]. С учетом производства архитектурно-декоративных бетонов, мы несколько изменили схему топологической структуры бетонов нового поколения, ранее представленную в работах д.т.н. В.И.Калашникова и его учеников. Исключая из состава нанометрический микрокремнезем и добавляя минеральные пигменты с микрометрическим и с верхним наноразмерным уровнем, схема приобретает вид (рис. 3.1):

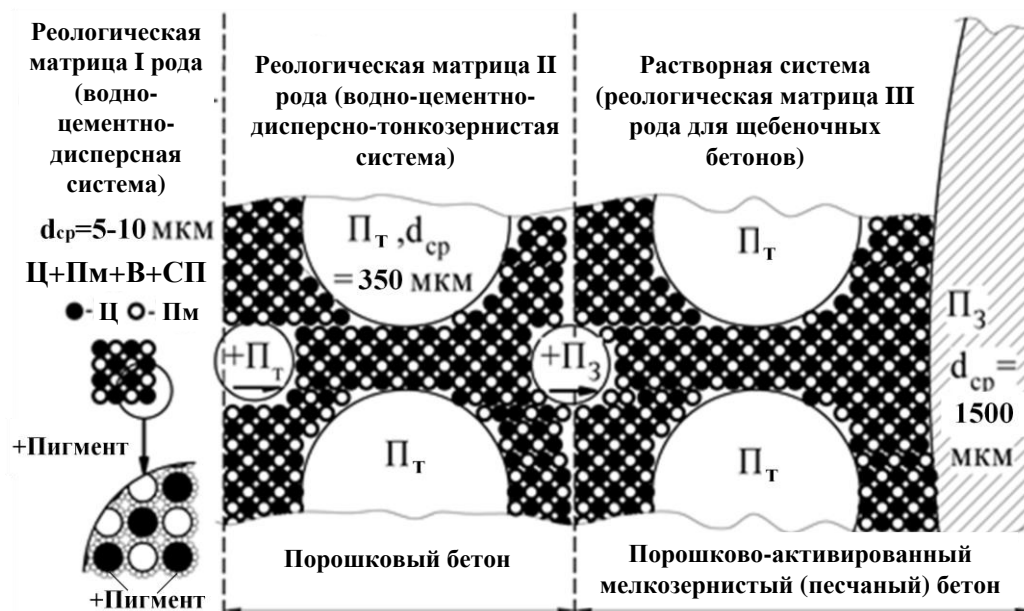


Рис. 3.1 Схема топологической структуры окрашенного порошково-активированного тонкозернистого бетона нового поколения

Измененная классификация реологических матриц (рис 3.1) в пластифицированных бетонах нового поколения с добавлением нанометрических пигментов подразделяется на три вида: условная реологическая водно-дисперсная матрица I рода, условная реологическая матрица II рода, и для щебеночных бетонов условная реологическая матрица III рода. Условными матрицы называются потому, что при образовании каждой условно присутствует вся вода затворения, а не часть ее.

Матрица I рода характеризует водно-цементно-минерально-дисперсную систему. В порошковых бетонах в роли компонентов такой системы выступают цемент, тонкомолотая порода и вода, в реакционно-порошковых бетонах дополнительно присутствует МК. Таким образом, для архитектурно-декоративных окрашенных бетонов к составным компонентам условной реологической матрицы I рода добавляются взамен МК пигменты с наномикрочастицами. 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. 0,16-0,63 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 мелкозернистых (песчаных) бетонов, а для щебеночной порошково-активированной бетонной смеси способствует свободному перемещению зерен щебня без взаимодействия друг с другом, создавая необходимую прослойку между этими зернами.

Реотехнологические показатели, характеризующие растекаемость, самонивелируемость и самоуплотняемость порошково-активированных бетонных смесей нового поколения, определяются по многочисленным методам, предложенным немецкой компанией «TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH», и регламентируются Евростандартом [158, 159, 160]. Для самоуплотняющихся бетонов в европейском документе при определении скорости растекания и вязкости смеси рекомендуется использовать расплыв смеси из стандартного конуса (диаметр нижний 20 см, диаметр верхний 10 см, высота 30 см) и из конуса Хегерманна. Определяют диаметр расплыва стандартного конуса и время растекания бетонной смеси до достижения диаметра 500 мм, а также общее время растекания. Вязкость и скорость течения бетонной смеси определяют временем истечения ее из V-образных воронок, которое для раствора должно быть в диапазоне 10с, а для бетона 10-20с. Другие методы используются для имитации растекания бетонных смесей между стержнями арматурных каркасов.

Ввиду отсутствия в отечественных заводских лабораториях приборов Евростандарта для определения реотехнологических показателей бетонной смеси мы использовали наиболее распространенные в них приборы – конус Хегерманна (ГОСТ 310.4-81), стандартный конус (ГОСТ 10181.1-81).

Для того чтобы изготовить большое количество смесей с большим количеством варьируемых факторов и испытать их на стандартном конусе, объем которого равен 5,495 л, пришлось бы сократить количество



запланированных исследований. Нами было изучено влияние значительного количества варьируемых факторов (до 7-8) по числу используемых компонентов в различных комбинациях. Для этого с целью охвата большого числа количественных и качественных (вид каменной муки, вид цемента, вид песка заполнителя, В/Ц и т.п.) входных факторов в предварительных экспериментах использовали реотехнологические приборы, позволяющие уменьшить объемы суспензий. Для предварительной оценки подвижности суспензий в исследованиях порошковых бетонов применяли видоизмененный минивискозиметр Суттарда (глава 2.2). Это позволило определить примерное количество воды, требуемой для растекания суспензии. В последующих экспериментах с целью определения подвижности порошково-активированных бетонных смесей по Евростандарту применяли конус Хегерманна и, параллельно, малый конус (верхний диаметр 50 мм, нижний диаметр 100 мм, высота 220 мм), который был проградуирован нами в лаборатории и на заводах ЖБИ на осадку и расплыв стандартного конуса. Это значительно сократило время, объемы смесей и количество экспериментов. Предварительно определив расплыв и осадку малого конуса, можно было перейти к расплыву и осадке стандартного конуса.

В связи с практической наработкой экспериментальных результатов (табл. 3.1) нами была проведена корреляция значений расплывов малого конуса и расплывов смеси из конуса Хегерманна. Построение градуировочной кривой (рис. 3.2) позволило подтвердить теоретическую зависимость для самоуплотняющихся порошковых и порошково-активированных бетонных смесей. Экспериментальные значения позволили вывести аналитическое уравнение, которое использовалось при подборе пробных замесов и выборе оптимальных составов:

$$P_{KM} = 1,629P_{KH} - 5,95 , \quad (3.1)$$

где  $P_{KM}$  – расплыв конуса малого, см;

$P_{KH}$  – расплыв конуса Хегермана, см.

Статистическая наработка экспериментальных данных по расплывам

Расплав конуса Хегерманна ( $V=374 \text{ см}^3$ ), см	Расплав малого конуса, ( $V=1007 \text{ см}^3$ ), см
32	46,5
32	46,4
21	29,5
36	52,5
36,2	52,8
31,5	46,3
32,8	49
30	43
30,8	44
31,5	45,5
29,5	40
31,5	47
33	49
29,5	40
26	37,8
28,5	40

Как видно из рис. 3.2, зависимость значений расплывов малого конуса от расплыва смеси из конуса Хегерманна является линейной, с коэффициентом корреляции, равным 0,95. Это свидетельствует о том, что законы реологии при течении малоструктурированных жидкостей действуют независимо от близких по объему растекающихся жидкостей (до определенных границ растекания) с чрезвычайно низким пределом текучести. Уравнение справедливо при расплыве малого конуса не менее 25-30 см.

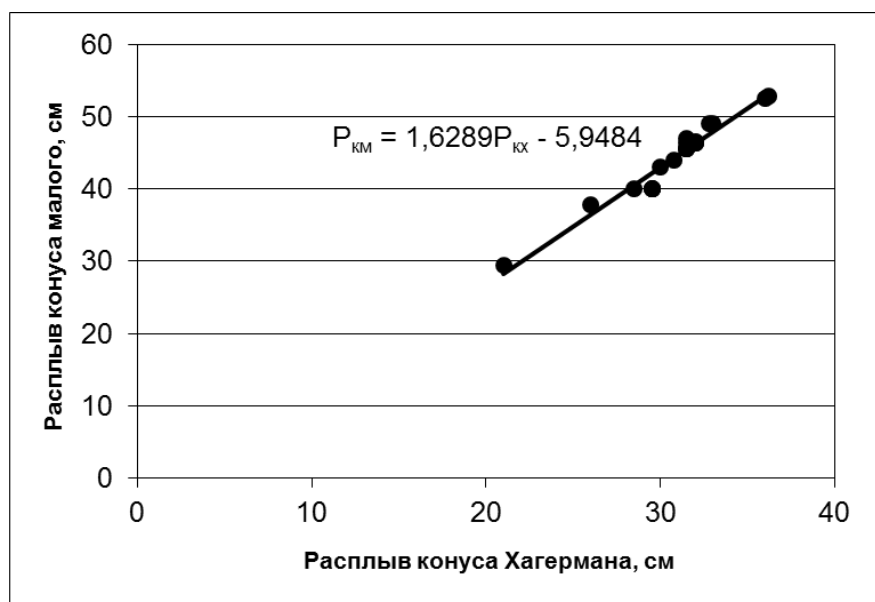


Рис. 3.2 Зависимость расплыва смеси из малого конуса от расплывов смеси из конуса Хегерманна

Для уменьшения объемов бетонных смесей при определении осадки стандартного конуса ( $OK_{ст}$ ) в предварительных опытах пользовались малым

конусом и пересчитывали осадку смеси из него на  $OK_{CT}$  по ранее установленному уравнению [25]:

$$OK_{CT} = 0,64 + 1,36(OK_M) - 0,00686(OK_M)^2, \quad (3.2)$$

где  $OK_{CT}$  – осадка конуса стандартного, см;

$OK_M$  – осадка конуса малого, см.

Это уравнение соответствует экспериментальным результатам при осадке стандартного конуса не менее 15-17 см.

### **3.2 Реотехнологические свойства пластифицированных дисперсных суспензий с различными пигментами и наполнителями**

С целью определения характера влияния различных суперпластификаторов (СП) на реологические свойства цементных и минеральных суспензий, а также окрашенных пигментами суспензий, было проведено исследование их расплывов. В качестве пластифицирующих добавок использовали отечественный СП на меламиновой основе Мельмент F10 и гиперпластификаторы нового поколения на поликарбоксилатной основе: отечественный Хидетал 9γ и пластификатор германского производства Melflux 5581F. Суперпластификаторы вводились с водой затворения. Для экономии материала и времени проведения эксперимента при предварительной оценке реотехнологических свойств суспензий применяли малый вискозиметр Сутгарда диаметром 10 мм высотой 40 мм (глава 2.2). Проведя аналитический обзор литературы, пришли к выводу, что наибольший реотехнологический эффект при максимальном экономическом эффекте достигается при введении 1% пластифицирующей добавки от массы цемента.

### **3.2.1 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты суспензий из различных цементов, дисперсных наполнителей и пигментов**

На первоначальном этапе изучались реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты ( $B_{\text{э}}$ ) суспензий на различных цементах. Исследования проводились на цементах как отечественного, так и зарубежного производства: цемент белый Египетский СЕМ 52,5, цемент белый Бельгийский СЕМ 52,5, цемент белый Датский СЕМ 52,5, цемент белый Коломенский СЕМ 52,5, цемент серый Вольский М500 Д0, цемент серый Красноярский М500 Д0.

Цементные суспензии приготавливались с различным водоцементным отношением, при котором обеспечивались близкие расплывы контрольных составов. Для определения водоредуцирующего эффекта была изучена растекаемость цементных суспензий в зависимости от вида СП и ГП.

Результаты эксперимента представлены в табл.3.2 и на рис.3.3.

Равнозначные расплывы на пластифицированных системах, равные для контрольных систем 30 мм, получить практически невозможно. Это связано с тем, что в пластифицированных системах происходит лавинообразный структурно-механический переход от твердообразного состояния к жидкообразному при добавлении очень малого количества воды. Поэтому расплывы пластифицированных систем всегда были выше контрольных, что шло в «запас» реологии суспензии.

Реотехнологический и водоредуцирующий эффекты зависят не только от степени разжижения цементных суспензий с суперпластификатором, но и от водопотребности цементов без пластификатора. Поэтому чем больше воды требуется для растекания непластифицированной суспензии при одном и том же значении расплыва с суперпластификатором, тем больше будет водоредуцирующий эффект. Объясняется это тем, что цементные суспензии в большей степени агрегируют и требуют значительного количества воды для равноподижной системы.

Изменение значений В/Ц пластифицированных цементных суспензий в зависимости от вида пластификатора

Вид цемента	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Ц	Распływ, Д, мм
Цемент белый Египетский СЕМ I 52,5Б $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,53	30
	Хедитал 9γ	0,212	39
	Melflux 5581F	0,186	36
	Мельмент F10	0,27	38
Цемент белый Датский СЕМ I 52,5Б $S_{уд} = 3300 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,55	30
	Хедитал 9γ	0,23	39
	Melflux 5581F	0,205	38
	Мельмент F10	0,28	37
Цемент белый Бельгийский СЕМ I 52,5Б $S_{уд} = 4100 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,56	30
	Хедитал 9γ	0,230	37
	Melflux 5581F	0,203	39
	Мельмент F10	0,286	31
Цемент белый Коломна СЕМ I 52,5Б $S_{уд} = 3400 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,6	30
	Хедитал 9γ	0,232	38
	Melflux 5581F	0,205	34
	Мельмент F10	0,315	32
Цемент серый Вольский СЕМ I 42,5Б $S_{уд} = 2900 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,49	30
	Хедитал 9γ	0,216	33
	Melflux 5581F	0,172	34
	Мельмент F10	0,318	31
Цемент серый Красноярский СЕМ I 42,5Б $S_{уд} = 3600 \text{ см}^2/\text{Г}$	Смесь без СП	0,44	30
	Хедитал 9γ	0,191	31
	Melflux 5581F	0,168	34
	Мельмент F10	0,254	31

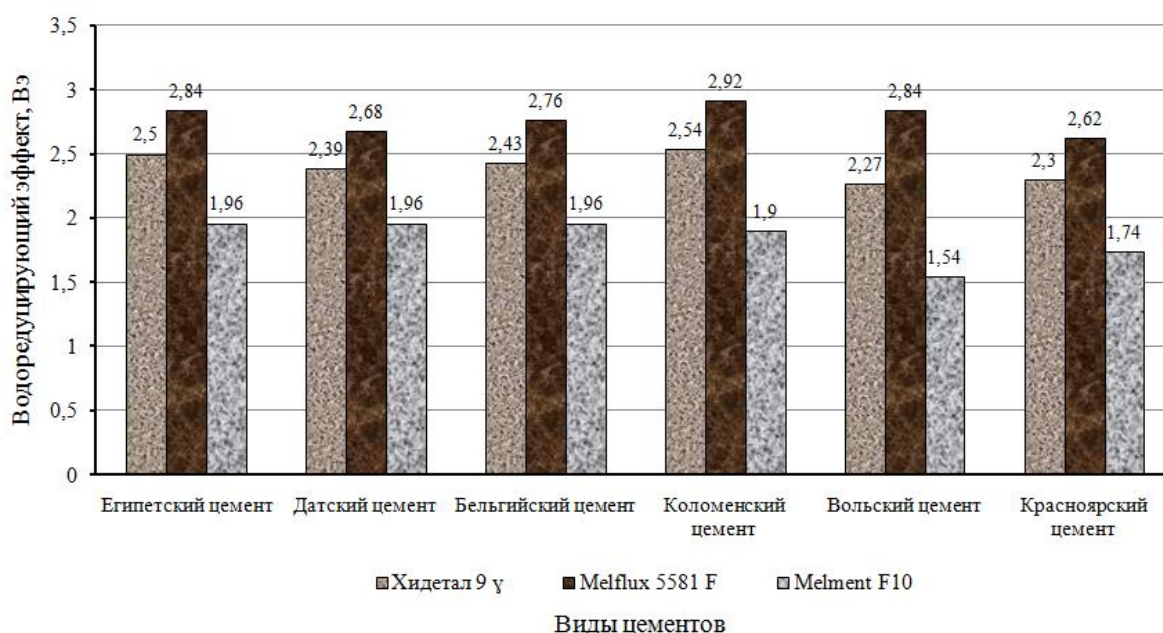


Рис. 3.3 Значения водоредуцирующего эффекта цементных суспензий

Из анализа значений водоредуцирования видно, что максимальный водоредуцирующий эффект ( $V_3$ ) для белых цементов обеспечивает пластификатор Melflux 5581 ( $V_3 = 2,68-2,92$ ). Для исследуемых серых цементов максимальное значение  $V_3$  составляет 2,84 (Вольский цемент). Стоит отметить, что суперпластификатор старого поколения на меламиновой основе существенно уступает и на серых и на белых цементах действию двух других. Причем  $V_3$  на белых цементах с применением Мельмент F10 имеет либо одинаковое, либо очень близкое значение и находится в пределах 1,9-1,96. Поэтому применение суперпластификатора Мельмент F10, часто рекомендуемого для получения самоуплотняющихся бетонов, необоснованно.

Кроме оценки цементных суспензий производилась оценка пригодности порошковых наполнителей по реотехнологическим характеристикам суспензий из горных пород. Для выявления  $V_3$  исследовали реологическую активность суспензий наполнителей в смеси с СП. Тонкодисперсные реологически-активные минеральные компоненты необходимо вводить в цементные растворы и бетоны, особенно малоцементные, с целью увеличения реологической матрицы и реологической активности системы в целом. В качестве тонкодисперсных реологически-активных наполнителей мы использовали тонкомолотые отходы четырех горных пород, а для сравнения – пылевидный микрокварц ЛГОК (табл. 3.3).

Применение каменной муки, полученной из отходов или отсевов камнедробления, является целесообразным не только с позиции экологии и экономики, но и с точки зрения создания порошковых и порошково-активированных бетонов нового поколения.

Анализируя табл. 3.3, обратим внимание на очень низкое  $V/T$ , равное 0,18-,0,20 на ГП Melflux 5581F и Хидетал  $\gamma_9$  соответственно, полученное на молотом известняке г. Стерлитамак.

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий различных дисперсных наполнителей в зависимости от вида пластификатора

Вид дисперсного наполнителя	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Мрамор молотый $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$	-	0,46	30
	Хедитал 9γ	0,155	39
	Melflux 5581F	0,144	38
	Мельмент F10	0,20	37
Известняк молотый г. Тольятти $S_{уд} = 4800 \text{ см}^2/\text{г}$	-	0,42	30
	Хедитал 9γ	0,158	39
	Melflux 5581F	0,15	37
	Мельмент F10	0,253	32
Известняк молотый г. Стерлитамак $S_{уд} = 3400 \text{ см}^2/\text{г}$	-	0,41	30
	Хедитал 9γ	0,120	33
	Melflux 5581F	0,118	33
	Мельмент F10	0,184	32
Гранит молотый Павловский $S_{уд} = 3700 \text{ см}^2/\text{г}$	-	0,58	30
	Хедитал 9γ	0,212	34
	Melflux 5581F	0,186	33
	Мельмент F10	0,42	30
Микроварц $S_{уд} = 3400 \text{ см}^2/\text{г}$	-	0,325	30
	Хедитал 9γ	0,325	33
	Melflux 5581F	0,305	36
	Мельмент F10	0,325	33

Если ориентироваться на известняковые месторождения России, то можно полагать, что на целом ряде известняков можно получить высокопластифицированные суспензии при очень малом содержании воды. Это открывает большие возможности для получения архитектурно-декоративных белых и окрашенных бетонов. Поэтому исследование реологической активности известняков и комбинации их с цементом в пластифицированных суспензиях является важным этапом тестирования не только цементов, но и дисперсных наполнителей.

В ходе эксперимента было установлено, что максимальный водоредуцирующий эффект минеральных суспензий отмечен при использовании гиперпластификатора Melflux 5581F, и он выше, чем на цементных суспензиях. Этот пластификатор позволяет увеличивать растекаемость минеральных пластифицированных суспензий относительно непластифицированных в 2,8-3,47 раза (рис. 3.4).

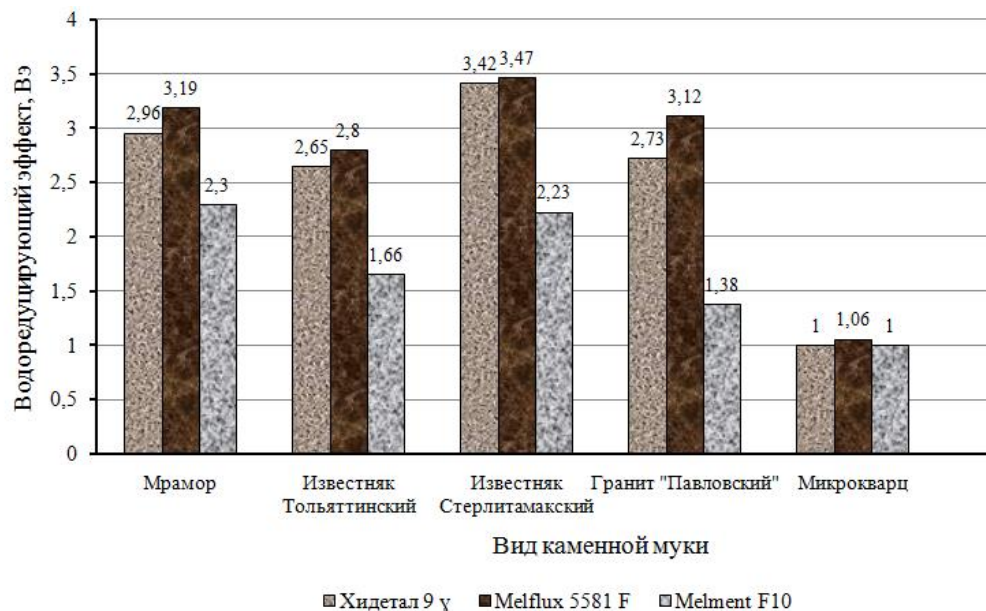


Рис. 3.4 Значения водоредуцирующего эффекта минеральных суспензий

Исключением являются  $V_{э}$  суспензий на микрокварце. Отмечено, что на растекаемость суспензии из микрокварца никак не влияет ни один из выбранных пластификаторов. Это можно объяснить неизбирательным действием полиионов СП и низкой адсорбцией его на поверхности частиц кварца в водной дисперсии, что связано с отрицательно заряженной поверхностью частиц микрокварца. Для перезарядки поверхности частиц кварца и усиления пластифицирующего действия СП и ГП достаточно ввести в водную минеральную суспензию небольшое количество цемента или извести (0,1%-0,2% от массы минерального компонента). Это доказал в своих исследованиях профессор Калашников В.И. [97].

Стоит отметить, что реотехнологический эффект ГП Хидетал 9γ в водных суспензиях изученных горных пород мало отличается от реотехнологического эффекта ГП Melflux 5581F при дозировке 1% от массы минерального компонента. В среднем это отличие для разных дисперсных наполнителей находится в диапазоне 1,5%-12%. Как и на цементных суспензиях, действие СП Мельмент F10 значительно слабее, чем двух других пластифицирующих добавок.

Для архитектурно-декоративных бетонов очень важно учитывать действие окрашивающих компонентов (пигментов или органических красителей) на реотехнологические свойства бетонной смеси. В результате



аналитического обзора литературы нами не были выявлены результаты работ по изучению влияния пигментов на реотехнологические свойства смеси в бетонах нового поколения. В связи с этим мы посчитали необходимым изучить реотехнологические свойства как в чистых суспензиях пигментов, так и в бинарных и тройных системах.

В табл. 3.4 представлены результаты изучения реотехнологических свойств различных пигментов.

Таблица 3.4

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий различных пигментов в зависимости от вида пластифицирующей добавки

Вид пигмента	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
TiO <sub>2</sub> (белый) S <sub>уд</sub> =25400 см <sup>2</sup> /г Китай	-	1,20	30
	Хедитал 9γ	0,395	29
	Melflux 5581F	0,368	32
	Мельмент F10	0,30	31
TiO <sub>2</sub> (белый) S <sub>уд</sub> =22400 см <sup>2</sup> /г Украина	-	1,17	30
	Хедитал 9γ	0,377	29
	Melflux 5581F	0,346	32
	Мельмент F10	0,33	30
ZnO (белый) S <sub>уд</sub> = 17400 см <sup>2</sup> /г	-	2,75	30
	Хедитал 9γ	0,254	31
	Melflux 5581F	0,226	32
	Мельмент F10	0,278	31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (зеленый) S <sub>уд</sub> = 13200 см <sup>2</sup> /г	-	0,62	30
	Хедитал 9γ	0,53	30
	Melflux 5581F	0,462	31
	Мельмент F10	0,514	30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (красный) S <sub>уд</sub> = 17200 см <sup>2</sup> /г	-	0,884	30
	Хедитал 9γ	0,73	30
	Melflux 5581F	0,388	32
	Мельмент F10	0,70	31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (желтый) S <sub>уд</sub> = 34700 см <sup>2</sup> /г	-	2,98	30
	Хедитал 9γ	2,08	30
	Melflux 5581F	1,66	31
	Мельмент F10	1,33	30
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (черный) S <sub>уд</sub> = 11400 см <sup>2</sup> /г	-	1,11	30
	Хедитал 9γ	0,765	30
	Melflux 5581F	0,587	31
	Мельмент F10	0,805	31

Анализируя данные табл. 3.4, можно отметить высокие значения В/Т для всех пигментов на водных непластифицированных суспензиях, изменяющиеся от 0,62 до 2,98. Это можно объяснить присутствием в гранулометрическом составе высокопотребных наночастиц. Однако

реотехнологические эффекты лишь для трех пигментов превышают значения минеральных дисперсных наполнителей (рис 3.5). Только оксид цинка имеет очень большой  $V_3$ , достигающий значения 9,89 для СП Мельмент F10 и 12,17 для ГП Melflux 5581F. Остальные пигменты имеют  $V_3$  меньше, чем в цементных суспензиях. При этом значения  $V_3$  суспензий, пластифицированных СП Мельмент F10, мало уступают значениям  $V_3$  на ГП Melflux 5581F и Хидетал 9γ, а в некоторых случаях превосходят их. Это является результатом действия синергии пигмента и СП.

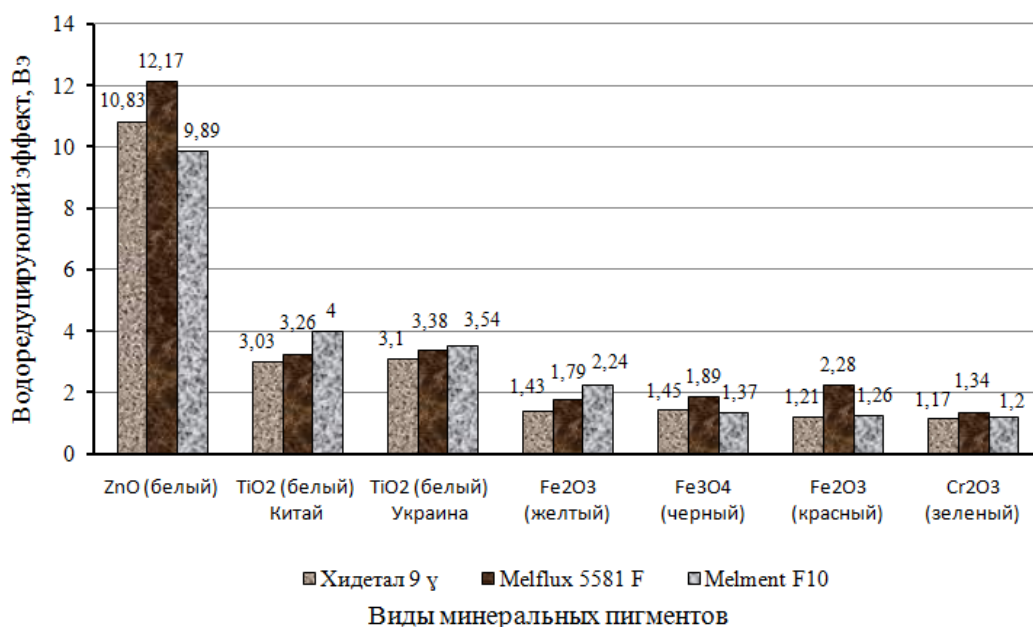


Рис. 3.5 Значения водоредуцирующего эффекта суспензий пигментов

Однако, учитывая то, что пигменты для окрашивания в бетонную смесь добавляют в незначительном количестве (как правило, до 8% от массы цемента), действие пигмента на реотехнологические показатели бетонной смеси необходимо исследовать в его незначительном количестве в комбинации с портландцементом и дисперсными наполнителями. Вследствие малого количества пигмента в смеси его действие может быть незаметным. В соответствии с этим дальнейшие исследования действия пигментов проводились в бинарных и тройных системах.

### 3.2.2 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты бинарных суспензий в составе «цемент – дисперсный наполнитель»

На втором этапе исследований были изучены реотехнологические свойства смешанных цементно-минеральных суспензий. В большей своей

массе при создании архитектурно-декоративных бетонов для придания светлых оттенков бетонной смеси используют белый цемент, белые или светлые дисперсные наполнители. Поэтому в комбинации с белыми цементами были изучены светлые дисперсные наполнители – известняк, мрамор, микрокварц. Для сравнения результатов в комбинации с серыми цементами была изучена гранитная мука. На данном этапе исследований, исходя из результатов, полученных на цементных и минеральных суспензиях, было важно выявить синергетическое взаимодействие различных видов цемента с различными дисперсными наполнителями и определить реотехнологические показатели бинарных систем. В комбинации «цемент – каменная мука» было выбрано соотношение 1:1. Если при таком соотношении каменная мука не ухудшает реологических свойств по сравнению со свойствами цементной суспензии, то и при меньшем содержании муки эти свойства не ухудшатся. Результаты исследований представлены в таблицах 3.5-3.9 и на рис. 3.6

Таблица 3.5

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий «цемент Бельгийский – каменная мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Цемент Бельгийский 50% Мраморная мука 50%	-	0,51	30
	Хедитал 9γ	0,222	36
	Melflux 5581F	0,190	37
	Мельмент F10	0,268	31
Цемент Бельгийский 50% Известняковая мука (г. Тольятти) 50%	-	0,48	30
	Хедитал 9γ	0,213	36
	Melflux 5581F	0,183	36
	Мельмент F10	0,260	30
Цемент Бельгийский 50% Микрокварц 50%	-	0,53	30
	Хедитал 9γ	0,221	35
	Melflux 5581F	0,196	36
	Мельмент F10	0,275	36
Цемент Бельгийский 50% Известняковая мука (г. Стерлитамак) 50%	-	0,51	30
	Хедитал 9γ	0,159	33
	Melflux 5581F	0,147	34
	Мельмент F10	0,226	31

Анализ табл. 3.5 показал, что введение дисперсного наполнителя в суспензию с Бельгийским цементом снижает значение В/Т относительно чистой цементной суспензии и повышает его относительно минеральной

суспензии. Это характерно для всех видов исследуемых СП и ГП. В свою очередь,  $V_9$  (рис. 3.6, а) суспензии в комбинации бельгийского цемента и каменной муки на всех пластификаторах ниже аналогичных показателей чистых цементных и минеральных суспензий. Исключение составляет бинарная система «Бельгийский цемент – известняковая мука (г. Стерлитамак)». В этой комбинации отмечается высокий показатель  $V_9=3,47$ , близкий к подобному показателю на чистой минеральной суспензии из молотого известняка (г. Стерлитамак) с ГП Melflux 5581F.

Бликие реотехнологические показатели отмечены при исследовании комбинации «цемент Датский – каменная мука» (табл. 3.6; рис 3.6, б).

Таблица 3.6

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий «Датский цемент – каменная мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Цемент Датский 50% Мраморная мука 50%	-	0,50	30
	Хедитал 9γ	0,210	35
	Melflux 5581F	0,175	36
	Мельмент F10	0,254	32
Цемент Датский 50% Микрокварц 50%	-	0,53	30
	Хедитал 9γ	0,214	33
	Melflux 5581F	0,185	35
	Мельмент F10	0,253	34
Цемент Датский 50% Известняковая мука (г. Тольятти) 50%	-	0,48	30
	Хедитал 9γ	0,204	36
	Melflux 5581F	0,174	36
	Мельмент F10	0,251	34
Цемент Датский 50% Известняковая мука (г. Стерлитамак) 50%	-	0,50	30
	Хедитал 9γ	0,157	34
	Melflux 5581F	0,145	34
	Мельмент F10	0,217	33

Полученные результаты свидетельствуют о том, что добавление тонкодисперсного наполнителя к Датскому цементу снижает В/Т и усиливает разжижающий эффект действия пластификаторов. Так, добавление тонкомолотой известняковой муки (г. Стерлитамак) снижает В/Т цементной суспензии, пластифицированной ГП Melflux 5581F, с 0,205 до 0,140. Значение водоредуцирующего эффекта на ГП Melflux 5581F при введении различных дисперсных наполнителей в суспензию Датского цемента увеличивается в среднем на 7-28%.

Дисперсные наполнители в комбинации с Коломенским цементом показывают более высокие реотехнологические эффекты (табл. 3.7; рис. 3.6, в)

Таблица 3.7

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий «Коломенский цемент – каменная мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Расплыв, Д, мм
Цемент Коломенский 50% Мраморная мука 50%	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,215	36
	Melflux 5581F	0,184	35
	Мельмент F10	0,273	32
Цемент Коломенский 50% Микрокварц 50%	-	0,55	30
	Хедитал 9γ	0,202	36
	Melflux 5581F	0,176	35
	Мельмент F10	0,255	34
Цемент Коломенский 50% Известняковая мука (г. Тольятти) 50%	-	0,49	30
	Хедитал 9γ	0,192	30
	Melflux 5581F	0,173	36
	Мельмент F10	0,262	31
Цемент Коломенский 50% Известняковая мука (г. Стерлитамак) 50%	-	0,525	30
	Хедитал 9γ	0,160	33
	Melflux 5581F	0,148	33
	Мельмент F10	0,230	31

В суспензии «Коломенский цемент – известняковая мука (г. Стерлитамак)» были получены значения  $V_3$ , равные 3,55 на ГП Melflux 5581F и 3,28 на ГП Хедитал 9γ.

Стоит отметить, что на чистой цементной суспензии из Коломенского цемента значение  $V_3$  было больше аналогичных значений в суспензиях трех других белых цементов. Однако максимальные реотехнологические показатели отмечены в бинарных системах Египетского цемента и дисперсных наполнителей (табл.3.8; рис 3.6, г). Это объясняется большей совместимостью данного цемента с дисперсными наполнителями и пластифицирующими добавками.

Примечательно, что в непластифицированной системе добавление в цементную суспензию 50% дисперсного наполнителя снижает В/Т незначительно – от 2% до 8%, в зависимости от вида минерального компонента. В пластифицированных системах этот показатель изменяется в гораздо большем диапазоне, особенно при добавлении известняков. Так, при

введении тольяттинского известняка в цементную суспензию, пластифицированную ГП Melflux 5581F, В/Т уменьшается на 14%, а при введении стерлитамакского известняка – на 25%. В близком диапазоне находятся и изменения В/Т суспензий при пластификации их СП Мельмент F10 и ГП Хедитал 9γ.

Таблица 3.8

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий «Египетский цемент – каменная мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50%	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,173	32
	Melflux 5581F	0,156	34
	Мельмент F10	0,258	33
Цемент Египетский 50% Микрокварц 50%	-	0,51	30
	Хедитал 9γ	0,193	35
	Melflux 5581F	0,171	36
	Мельмент F10	0,250	36
Цемент Египетский 50% Известняковая мука (г. Тольятти) 50%	-	0,49	30
	Хедитал 9γ	0,183	36
	Melflux 5581F	0,160	34
	Мельмент F10	0,246	33
Цемент Египетский 50% Известняковая мука (г. Стерлитамак) 50%	-	0,50	30
	Хедитал 9γ	0,150	33
	Melflux 5581F	0,140	31
	Мельмент F10	0,230	31

Обращает на себя внимание «рекордное значение»  $V_3$  в бинарных суспензиях: «Египетский цемент – каменная мука», равное 3,57 на ГП Melflux 5581F с добавлением молотого известняка г. Стерлитамак. При введении других дисперсных наполнителей показатель  $V_3$  также очень значителен. Значения  $V_3$  в бинарных суспензиях Египетского цемента и дисперсных наполнителей превышают аналогичный показатель на чистых суспензиях цемента и в суспензиях отдельно взятого минерального компонента.

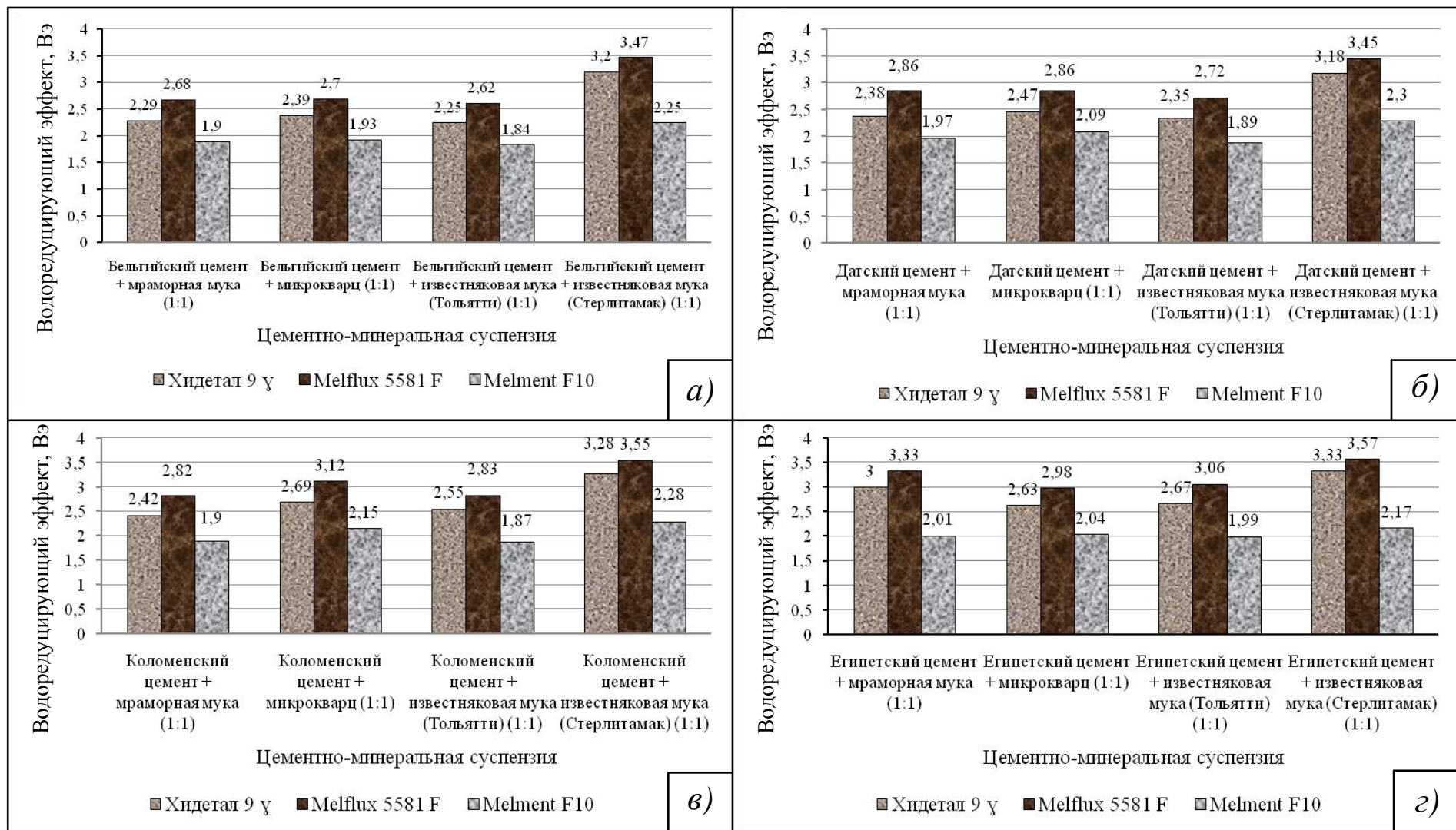


Рис. 3.6 Значения водоредуцирующего эффекта бинарных суспензий в составе: «цемент – дисперсный наполнитель» в соотношении 1:1 с различными цементами: а) Бельгийским; б) Датским; в) Коломенским; г) Египетским

Таким образом, в бинарной системе: «Египетский цемент – дисперсный наполнитель» при пластификации один из компонентов усиливает действие другого. Это объясняется тем, что в водно-минеральных суспензиях на основе каменной муки эффективность СП и ГП при сохранении растекаемости значительно повышается относительно цементных, вследствие отсутствия процессов гидратации.

Необходимо отметить то, что не реагирующий на действие пластификаторов микрокварц в чистой суспензии не только не снижает реотехнологические свойства бинарной системы относительно цементной, но и значительно их повышает независимо от вида пластифицирующей добавки.

На чистых цементных и минеральных суспензиях отмечалось, что действие СП Мельмент F10 существенно уступает действию двух других пластификаторов. Причем показатели водоредуцирующих эффектов на ГП Хидетал 9γ и ГП Melflux 5581F близки. Для двойных суспензий эта зависимость сохраняется. В целом, результаты исследований показали, что цементные и цементно-минеральные суспензии максимально разжижаются в присутствии ГП Melflux 5581 F. Адекватные результаты были получены и на серых цементах с гранитной мукой (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Реотехнологические свойства пластифицированных суспензий  
«серый цемент – гранитная мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Расплав, Д, мм	В <sub>э</sub>
Цемент Вольский 50% Гранитная мука, г.Павловск 50%	-	0,57	30	-
	Хедитал 9γ	0,196	34	2,81
	Melflux 5581F	0,172	36	3,12
	Мельмент F10	0,304	32	1,73
Цемент Красноярский 50% Гранитная мука, г.Павловск 50%	-	0,50	30	-
	Хедитал 9γ	0,178	34	2,91
	Melflux 5581F	0,160	33	3,31
	Мельмент F10	0,288	32	1,87

Это можно объяснить тем, что макромолекулы ГП Melflux 5581 F имеют значительно бóльшую молекулярную массу, чем у ГП Хидетал9γ и СП Мельмент F10. Большое значение имеет и разветвленная структурная цепь с



гидрофобной и гидрофильной функциональными группами. Вследствие этого молекулы адсорбируются на положительно заряженных частицах вяжущего и обеспечивают высокую пластификацию за счет электростатического и стерического эффектов.

Таким образом, полученные результаты на белых цементах в композиционной системе с каменной мукой свидетельствуют о том, что наиболее эффективным с позиции реологии является Египетский цемент. При выборе цемента для дальнейших исследований это было одним из важнейших критериев. Кроме того, учитывались стоимость и коэффициент отражения (белизна). Стоит отметить, что Египетский цемент из всех предложенных белых цементов является самым дешевым, а его коэффициент отражения (белизна) незначительно уступает только Датскому цементу. Поэтому при дальнейших исследованиях в качестве вяжущего вещества мы применяли наиболее эффективный Египетский цемент.

В проведенных исследованиях было изучено действие СП и ГП в цементно-минеральных суспензиях при соотношении цемента и наполнителя 50:50. Для архитектурно-декоративных бетонов нового поколения важно, чтобы соотношение компонентов в реологической матрице первого рода (цемент – дисперсный наполнитель) находилось в диапазоне от 50:50 до 80:20. Поэтому необходимо было изучить изменение расплывов и водоредуцирующих эффектов в зависимости от соотношения «цемент – каменная мука» с целью поиска оптимальных соотношений между цементом и минеральным компонентом. В связи с этим в работе были исследованы реологические свойства смешанных цементно-минеральных суспензий на белом Египетском цементе СЕМ 52,5 и тонкомолотом Стерлитамакском известняке с различными соотношениями «цемент : известняковая мука» и на наиболее эффективном ГП Melflux 5581F. Для сравнения и анализа полученных результатов такой же эксперимент был проведен на мраморной муке. Результаты исследований приведены в табл. 3.10-3.11 и на рис 3.7.

Таблица 3.10

Реотехнологические свойства пластифицированных суспензий  
«Египетский цемент – известняк» в зависимости от соотношения компонентов

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм	Вэ
Цемент Египетский 100%	-	0,53	30	-
	Melflux 5581F	0,186	36	2,84
Цемент Египетский 80% Известняк Стерлитамак 20%	-	0,52	30	-
	Melflux 5581F	0,167	37	3,11
Цемент Египетский 60% Известняк Стерлитамак 40%	-	0,51	30	-
	Melflux 5581F	0,156	36	3,27
Цемент Египетский 50% Известняк Стерлитамак 50%	-	0,50	30	-
	Melflux 5581F	0,140	31	3,57
Цемент Египетский 40% Известняк Стерлитамак 60%	-	0,49	30	-
	Melflux 5581F	0,135	34	3,63
Цемент Египетский 20% Известняк Стерлитамак 80%	-	0,47	30	-
	Melflux 5581F	0,128	35	3,67
Известняк Стерлитамак 100%	-	0,42	30	-
	Melflux 5581F	0,118	36	3,47

Анализ данных табл. 3.10 показал, что для водных суспензий, состоящих из 80% цемента и 20% известняковой муки, при введении ГП Melflux 5581F  $V_э$  составил 3,11, что больше значения  $V_э$  чистой цементной суспензии на 9%. При дальнейшем увеличении минеральной части бинарной системы «цемент – известняк» наблюдается снижение В/Т и увеличение значения  $V_э$ . Причем значительный скачок показателя  $V_э$  отмечается при соотношении 50:50 и составляет 3,57, что больше значения  $V_э$  для чистой цементной суспензии на 25%. При дальнейшем увеличении минерального компонента в системе происходит незначительное увеличение значения  $V_э$ ; оно составляет 3,67 для суспензии при соотношении «цемент : известняк», равном 20:80, что является максимальным значением  $V_э$  для рассматриваемой системы в заданном соотношении компонентов. Значение  $V_э$  на чистой минеральной суспензии составляет 3,47. Таким образом, уже при соотношении 50:50 водоредуцирующие эффекты бинарной системы превосходят аналогичные значения цементной и минеральной суспензий.

Похожие результаты были получены и при изучении влияния дозировки

мрамора в системе «цемент – мрамор». Отмечается, что максимальный скачок значения  $V_3$  в бинарной системе наблюдается при соотношении цемента и мрамора, равном 50:50. При такой дозировке компонентов показатель  $V_3$  составляет 3,33, что больше значения  $V_3$  чистой цементной суспензии на 17%. При дальнейшем насыщении системы дисперсным наполнителем вплоть до соотношения 20:80 значение  $V_3$  практически не изменяется (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Реотехнологические свойства пластифицированных суспензий  
«Египетский цемент – мрамор» в зависимости от соотношения компонентов

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм	$V_3$
Цемент Египетский 100%	-	0,53	30	-
	Melflux 5581F	0,186	36	2,84
Цемент Египетский 80% Мрамор 20%	-	0,53	30	-
	Melflux 5581F	0,177	35	2,99
Цемент Египетский 60% Мрамор 40%	-	0,525	30	-
	Melflux 5581F	0,166	36	3,16
Цемент Египетский 50% Мрамор 50%	-	0,52	30	-
	Melflux 5581F	0,156	34	3,33
Цемент Египетский 40% Мрамор 60%	-	0,505	30	-
	Melflux 5581F	0,151	35	3,34
Цемент Египетский 20% Мрамор 80%	-	0,49	30	-
	Melflux 5581F	0,147	38	3,33
Мрамор 100%	-	0,46	30	-
	Melflux 5581F	0,144	38	3,19

Из анализа рис.3.7 следует, что ломанные кривые изменения значений  $V_3$  изученных бинарных систем «цемент – известняк» и «цемент – мрамор» близки к симбатным. Это объясняется тем, что и мрамор и известняк состоят из  $CaCO_3$  (хотя имеют различное генетическое происхождение) и дают близкие значения  $V_3$  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 дешевому известняку. Учитывая редкие месторождения мрамора и большое количество месторождений известняка в России, этот выбор становится более очевидным.

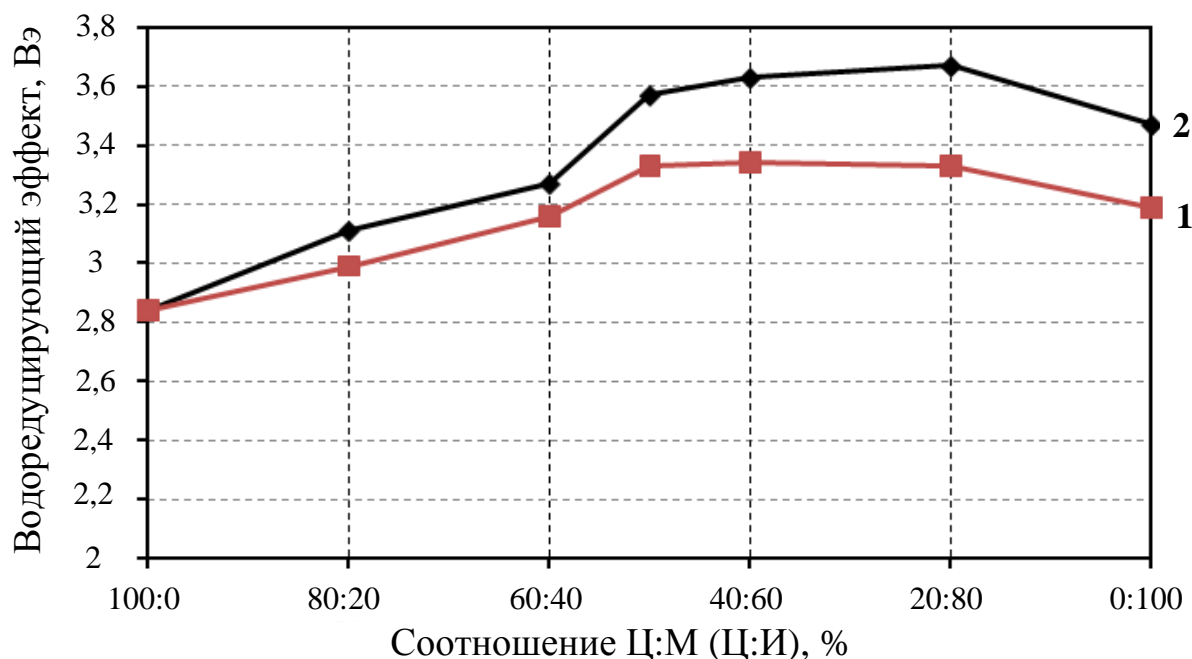


Рис. 4 Значения водоредуцирующих эффектов ( $B_{э}$ ) в бинарных пластифицированных цементно-минеральных суспензиях в зависимости от соотношения в смеси:

1 – цемента (Ц) и мрамора (М); 2 – цемента (Ц) и известняка (И)

Таким образом, нами обосновывается перспектива исследования известняковых месторождений для получения реологически-активной каменной муки.

### 3.2.3 Реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты трехкомпонентных суспензий в составе «цемент – дисперсный наполнитель – пигмент»

В параграфе 3.2.1 были изучены реотехнологические показатели водных суспензий различных пигментов (табл. 3.4, рис. 3.5). Учитывая, что пигменты вводят в состав бетонной смеси в небольших дозировках, важно было изучить действие малого количества пигмента на реотехнологические показатели тонкодисперсной матрицы состава «цемент – каменная мука». При изучении бинарных суспензий «цемент – известняковая мука» и «цемент – мраморная мука» было установлено, что реотехнологические свойства этих систем близки к симбатным. Суспензии на известняке имели чуть более высокие реотехнологические показатели. Но мрамор имеет больший коэффициент отражения света (белизна) относительно известняка, поэтому с целью изучения не только действия пигментов на подвижность смеси, но и визуальной оценки

яркости пигментов в составе тонкодисперсной матрицы в качестве дисперсного наполнителя была выбрана мраморная мука. Исследования проводились на пластифицированных системах «цемент – мраморная мука» в соотношении 50:50 с введением в состав пигментов в дозировке 5% от массы цемента. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.12 и на рис. 3.8.

Таблица 3.12

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий  
«цемент – дисперсный наполнитель – пигмент» в зависимости от вида  
пластифицирующей добавки

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Расплав, Д, мм
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% TiO <sub>2</sub> (белый) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,164	34
	Melflux 5581F	0,140	36
	Мельмент F10	0,255	33
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% TiO <sub>2</sub> (белый) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,179	33
	Melflux 5581F	0,150	34
	Мельмент F10	0,258	31
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% ZnO (белый) 5% от цемента	-	0,55	30
	Хедитал 9γ	0,169	34
	Melflux 5581F	0,152	34
	Мельмент F10	0,263	33
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (зеленый) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,174	35
	Melflux 5581F	0,156	34
	Мельмент F10	0,290	31
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (красный) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,173	34
	Melflux 5581F	0,156	35
	Мельмент F10	0,259	33
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (желтый) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,176	36
	Melflux 5581F	0,156	35
	Мельмент F10	0,29	30
Цемент Египетский 50% Мраморная мука 50% Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (черный) 5% от цемента	-	0,52	30
	Хедитал 9γ	0,177	32
	Melflux 5581F	0,156	34
	Мельмент F10	0,259	32

В результате исследований было установлено, что при дозировке 5% пигмента от массы цемента реотехнологические свойства тонкодисперсной матрицы повышаются при введении в систему белых пигментов – TiO<sub>2</sub> и ZnO. Так, при введении TiO<sub>2</sub> (Китай) значение В<sub>Э</sub> пластифицированной суспензии ГП Melflux 5581F возрастает на 11% относительно бинарной композиции

«цемент – мраморная мука». Это объясняется тем, что пигмент, имея высокую дисперсность, важную для образования текучих агрегативно-устойчивых и высококонцентрированных суспензий, обладает специфической поверхностью для адсорбции молекул ГП.

При добавлении в систему остальных окрашивающих компонентов в той же дозировке значения  $V_3$  остаются такими же, как в системе «цемент – мраморная мука», либо незначительно понижаются при использовании СП Мельмент F10.

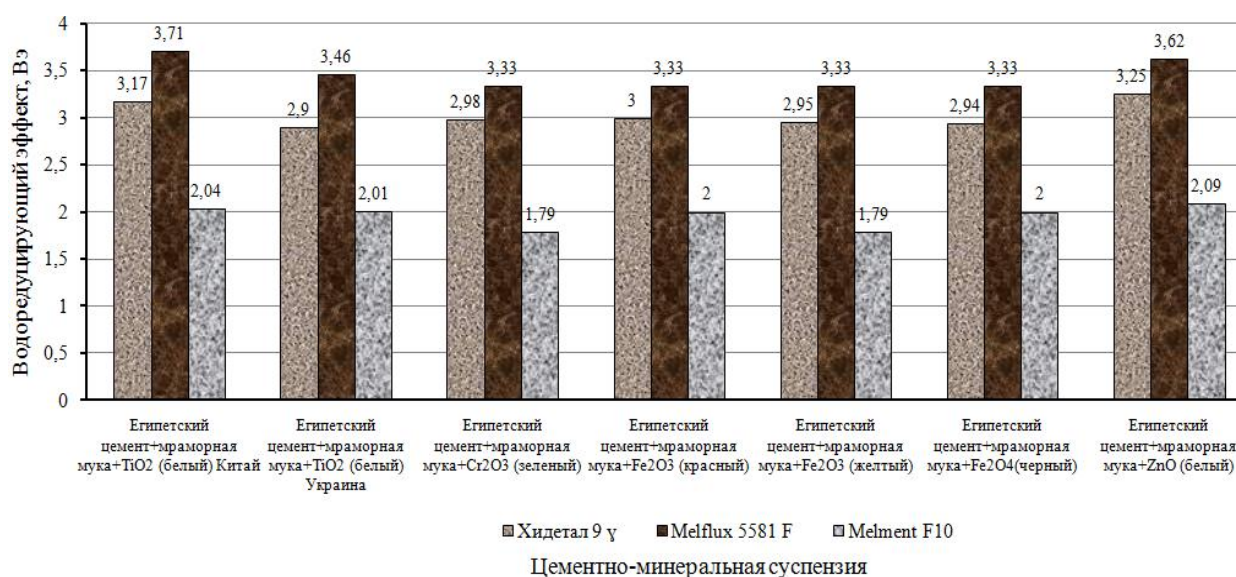


Рис. 3.8 Значения водоредуцирующего эффекта системы «цемент – дисперсный наполнитель – пигмент» в зависимости от вида пластификатора

При окрашивании бетона используют не только минеральные пигменты, но и органические, стойкие в щелочных условиях насыщенного раствора гидролизной извести в цементах и в известковых системах. Как известно, многие органические добавки даже при малых дозировках могут влиять на схватывание, структурообразование и реологию бетонной смеси. Заранее нельзя предсказать влияние органического красителя на реотехнологические свойства. Поэтому было изучено действие голубого фталоцианинового красителя (ГОСТ 6220-76) на реотехнологические показатели тонкодисперсной матрицы. Оценка воздействия фталоцианинового (ФЦ) красителя осуществлялась в тонкодисперсной системе «цемент – известняковая мука» в соотношении 60:40, пластифицированной ГП Melflux 5581F. Дозировка ФЦ

красителя в эксперименте менялась от 0,25% до 1% от массы цемента. Оценивалось изменение значений В/Т, которое затем сравнивалось с показателем чистой бинарной системы «цемент – известняковая мука». Результаты эксперимента приведены в табл. 3.13

Таблица 3.13

Изменение значений В/Т пластифицированных суспензий с различным содержанием Ф/Ц красителя пластификатором Melflux 5581F

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Цемент Египетский 60% Известняк 40%	Melflux 5581F	0,156	36
Цемент Египетский 60% Известняк 40% ФЦ краситель 0,25 % от Ц	Melflux 5581F	0,161	35
Цемент Египетский 60% Известняк 40% ФЦ краситель 0,5 % от Ц	Melflux 5581F	0,170	36
Цемент Египетский 60% Известняк 40% ФЦ краситель 0,75 % от Ц	Melflux 5581F	0,191	35
Цемент Египетский 60% Известняк 40% ФЦ краситель 1 % от Ц	Melflux 5581F	0,204	36

Из анализа таблицы следует, что при увеличении дозировки ФЦ красителя в суспензии значения В/Т увеличиваются. При этом отмечается незначительное увеличение показателя В/Т (на 8%) при введении красителя от 0,25% до 0,5% от массы цемента. При введении красителя с дозировкой 0,75%-1% показатель В/Т увеличивается на 22% и 30% соответственно. Таким образом, применение органического красителя с дозировкой более 0,5% от массы цемента для окрашивания бетонной смеси является необоснованным с позиции реологии. Визуальная оценка цвета бетонной смеси позволила заключить, что с точки зрения окрашивающей способности и сохранения реотехнологических свойств наиболее эффективно будет введение ФЦ красителя дозировкой 0,5% от массы цемента.

Таким образом, проведенные исследования показали, что введение в пластифицированную тонкодисперсную систему малого количества пигментов

не оказывает существенного воздействия на бетонную смесь с позиции реологии. В некоторых случаях при введении пигментов реотехнологические показатели бетонной смеси улучшаются.

Выполненные исследования показали, что цементные, минеральные и цементно-минеральные суспензии в большей степени разжижаются в присутствии зарубежного ГП Melflux 5581 F. Чуть менее эффективным показал себя отечественный ГП Хидетал 9γ.

### **Выводы по 3 главе**

1. Для снижения расходов сырьевых материалов и уменьшения количества экспериментов для установления реотехнологических показателей для самоуплотняющихся бетонов выявлена линейная зависимость расплыва пластифицированных смесей из малого конуса ( $h=22,1$  см;  $D=10$  см;  $d=5$  см) от расплыва из конуса Хегерманна. Это свидетельствует, что законы реологии при течении малоструктурированных жидкостей действуют независимо от объемов растекающихся жидкостей (до определенных границ растекания) с чрезвычайно низким пределом текучести.

2. Выявлены реотехнологические свойства и водоредуцирующие эффекты индивидуальных минеральных, бинарных и тройных суспензий с различными пластификаторами как реологической основы самоуплотняющихся архитектурно-декоративных бетонов. Максимальные эффекты достигнуты при использовании ГП Melflux 5581 F, чуть менее эффективным оказался более дешевый отечественный ГП Хидетал 9γ.

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.

4. Показана зависимость изменения значений водоредуцирующего эффекта



пластифицированной цементно-минеральной суспензии от соотношения компонентов в композиции. Выявлены оптимальные соотношения цемента и каменной муки (мраморной и известняковой) в реологической матрице высокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов.

5. Для окрашенных архитектурно-декоративных самоуплотняющихся порошково-активированных песчаных бетонов изучено действие различных органических пигментов в дозировке от 1% до 7% и неорганического фталоцианинового красителя в небольших дозировках на реотехнологические свойства пластифицированных цементно-минеральных суспензий. В результате исследований было установлено, что при введении пигментов реотехнологические свойства тонкодисперсной матрицы незначительно повышаются, что напрямую связано с высокой дисперсностью пигментов, равной 1200-3500 м<sup>2</sup>/кг, и наличием 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.

6. Осуществлен выбор сырьевых материалов для дальнейшего подбора оптимальных составов архитектурно-декоративных самоуплотняющихся порошково-активированных бетонов исходя из полученных результатов исследований реотехнологических свойств и водоредуцирующих эффектов различных суспензий, а также на основе технико-экономических показателей и возможности получения определенного оттенка цвета бетона при смешении различных компонентов.

#### **ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АРХИТЕКТУРНЫХ БЕТОНОВ И ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОРОШОВО- АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ СОВРЕМЕННЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ**

Архитектурно-декоративные бетоны приобретают все большую популярность, заменяя мелкоштучные изделия из керамики. Это объясняется не только идеальным сочетанием конструктивных и художественных возможностей бетонов нового поколения, но и возможностью их использования в крупногабаритных изделиях (стенные панели, архитектурные формы, декоративные лестничные марши и др.), что определяет их экономическую эффективность. В индустриально развитых странах с совершенствованием технологий получения высокофункциональных высокопрочных бетонов их стали все чаще применять в окрашенном, декорированном виде в качестве архитектурно-декоративных, в том числе и для фасадов зданий класса «Люкс» [12, 17, 62, 63].

Предпосылкой к широкому применению бетонов в качестве архитектурно-декоративного материала послужило появление высокоэффективных суперпластификаторов нового поколения и тонкодисперсных минеральных наполнителей и заполнителей различного природного происхождения, в том числе цветных. Благодаря этому стало возможным получение бетонов нового поколения, под которыми подразумеваются бетоны высокой и сверхвысокой прочности, повышенной морозостойкости, коррозионной стойкости и, как следствие, высокой долговечности. Это в полной мере относится к декоративно-отделочным бетонам.

Оптимальное сочетание добавок-модификаторов, высокодисперсных пигментов, совмещение с ними других органических и минеральных материалов позволяет управлять реологическими свойствами бетонных смесей и модифицировать структуру бетона на микроуровне так, чтобы придать бетону свойства, обеспечивающие не только качество и эксплуатационную надежность, но и безграничные архитектурные возможности.

#### 4.1 Классификационные критерии формирования поверхности архитектурно-декоративных бетонов

Ранее в исследованиях [7] автором была дана классификация большого числа видов бетонов нового поколения. Но из программы исследования выпали специальные архитектурно-декоративные и защитно-отделочные бетоны нового поколения. Поэтому с целью понимания технологии и основных принципов производства архитектурно-декоративных бетонов нами была разработана и систематизирована новая терминология, представленная в настоящей главе.

В зависимости от тонкости помола и зернистости наполнителей и заполнителей мы классифицируем архитектурный бетон по возрастанию их дисперсности на: *порошковый бетон, реакционно-порошковый, порошково-активированный мелкозернистый и порошково-активированный щебеночный.*

Такая классификация позволяет получить более полное представление о виде присутствующих в бетонах наполнителей и их зернистости или дисперсности, а также использованного нанометрического микрокремнезема и пигмента.

Еще одним критерием оценки, по которому мы даем классификацию архитектурно-декоративных бетонов, является водоредуцирующий эффект. Этот показатель в бетонах старого поколения определяется по формуле

$$B_{\text{эф}} = \frac{(B/C)_H - (B/C)_П}{(B/C)_H} \cdot 100\% , \quad (4.1)$$

где  $(B/C)_H$  – водоцементное отношение непластифицированной смеси;

$(B/C)_П$  – водоцементное отношение пластифицированной смеси.

По водоредуцирующему эффекту пластифицированные бетонные смеси старого поколения с разными расходами цемента, принимая классификацию профессора В.И. Калашникова [7], разделяем следующим образом:

расход цемента 150-200 кг/м<sup>3</sup> –  $B_{\text{эф}} = 5-7\%$ ;

расход цемента 250-300 кг/м<sup>3</sup> –  $B_{\text{эф}} = 10-15\%$ ;

расход цемента 400-600 кг/м<sup>3</sup> –  $B_{\text{эф}} = 20-35\%$ .

Таким образом, для бетонных смесей старого и переходного поколений

применение различных пластификаторов, в том числе дорогих зарубежных гиперпластификаторов нового поколения на поликарбоксилатной основе, является малоэффективным при небольших расходах цемента, в том числе для архитектурно-декоративных бетонов.

Основными показателями, позволившими дать иную классификацию бетонов нового поколения по водоредуцирующему эффекту, явились результаты экспериментов по определению реологической активности каждого дисперсного компонента в отдельности, в комбинации с цементом и порошковых бетонов по водоредуцирующему эффекту в целом (глава 3). Целью этих экспериментов было значительное увеличение объема дисперсной фазы за счет добавления порошкового наполнителя и пигмента с присутствием нанометрических частиц для высокого разжижающего действия суперпластификатора. Эти эксперименты подтвердили, что производство эффективных архитектурно-декоративных бетонов нового поколения будет реализовано только тогда, когда основные усилия будут направлены на производство и подготовку качественных наполнителей и заполнителей. Было показано, что повышение эффективности архитектурно-декоративных порошковых бетонов может быть достигнуто добавлением ультравысокодисперсных кальцитов и пигментов. В этом случае водоредуцирующий эффект достигает 50% и более.

Таким образом, в архитектурно-декоративных бетонах нового поколения с высоким содержанием водопотребных высокодисперсных и тонкозернистых наполнителей водоредуцирующий эффект становится очень высоким.

Для архитектурно-декоративных бетонов нового поколения необходимым условием является высокое содержания водно-дисперсных суспензий –  $V_{ВД}$ . Объем их определяется из суммарного содержания цемента ( $V_{Ц}$ ), дисперсного наполнителя ( $V_{ДН}$ ), высокодисперсных пигментов ( $V_{П}$ ) и воды ( $V_{В}$ ):

$$V_{ВД} = V_{Ц} + V_{ДН} + V_{П} + V_{В} . \quad (4.2)$$

Доля водно-дисперсных суспензий  $C_{ВД}$  в объеме бетонной смеси  $V_{БС}$ .

определяется по формуле

$$C_{ВД} = \frac{V_{ВД}}{V_{БС}} \cdot 100\% . \quad (4.3)$$

Она в архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонах находится в пределах 35-40%.

Порошково-активированные и порошковые архитектурно-декоративные бетоны отличаются от песчаных и щебеночных тем, что первые на 50%-70% и более состоят из водно-дисперсных суспензий, а вторые – на 100 % из водно-дисперсно-тонкозернистых суспензий.

Еще одним ключевым критерием, позволяющим классифицировать архитектурно-декоративные бетоны нового поколения, является текстура и форма поверхности, а также способ ее получения. По такому принципу архитектурно-декоративные бетоны нового поколения нами были разделены на следующие виды:

- архитектурно-декоративные бетоны с высокодекоративной глянцевой и матовой поверхностями различного цвета;
- архитектурно-декоративные бетоны с мозаичной декоративной поверхностью под текстуру шлифованного природного камня;
- архитектурно-декоративные бетоны с использованием «игры света и тени» с выступами и углублениями различной формы (конической, цилиндрической, комбинированной формы и т.п.);
- архитектурно-декоративные бетоны с визуализацией графических изображений на поверхности;
- архитектурно-декоративные бетоны поверхности с имитацией под пильный и колотый натуральный камень.

Таким образом, нами сделана попытка расширения терминологии архитектурно-декоративных бетонов с учетом их визуального восприятия и технологической и экономической эффективности.

#### **4.1.1 Формирование высокодекоративных глянцевой и матовой поверхностей различного цвета на полимерных формах**

Метод формирования высокодекоративных глянцевой и матовой поверхностей различного цвета на полимерных формах является наиболее распространенным при формообразовании и формировании поверхности архитектурно-декоративных бетонов. В основу метода легло свойство бетона при наборе прочности создавать структуру поверхности, идентичную той, которую имеет материал, соприкасающийся с бетоном. Как правило, используют полимерные формы с рабочей глянцевой или матовой поверхностью, имеющей низкую адгезию к бетонной смеси и не «смачиваемой» воздухом. Это объясняется как экономической эффективностью, так и минимальной адгезией архитектурно-декоративных бетонов с поверхностью полимерных форм. Это, в свою очередь, облегчает процесс распалубки. Важным критерием выбора в пользу формообразования и формирования поверхности в полимерных формах является не только отсутствие необходимости дополнительной обработки поверхности, но и возможность придания изделию из бетона абсолютно любой формы и цвета. Стоит отметить, что формирование поверхности в полимерных формах позволяет получить высокоглянцевую поверхность различного цветового оформления без дорогостоящей и энергозатратной механической обработки – шлифовки и полировки. Причем степень отражения света от поверхности, полученной с помощью глянцевой формы, будет значительно выше, чем шлифованной.

При выборе способа формирования поверхности на полимерных формах в производственных условиях важно учитывать число оборотов форм, которое зависит не только от качества применяемого полимера, но и в большой степени от зернистости используемых в бетоне материалов. Производители полимерных форм в рекламных проспектах часто указывают число оборотов форм, но они не предусматривают, при каких бетонах какая оборачиваемость может быть обеспечена. Очевидно, что постоянная укладка составов с

крупнозернистыми абразивными включениями значительно снижает срок службы полимерных форм, в первую очередь высокоглянцевых. В этом смысле мы рекомендуем очень эффективные составы порошковых и порошково-активированных бетонов, частицы которых имеют малый размер, а бетонная смесь является литой и не требует вибрации, влияющей на износостойкость формы.

Нами было проведено большое количество экспериментов по получению высокоглянцевых и матовых поверхностей на полимерных формах на основе самоуплотняющихся бетонов нового поколения с созданием различных цветовых оттенков. Квинтэссенцией этих изысканий стала рекомендация кафедры «ТСМиД» Пензенского ГУАС к применению наших разработок при изготовлении энергосберегающих трехслойных крупноформатных стеновых блоков с долговечным глянцевым покрытием на основе высокопрочного архитектурно-декоративного бетона нового поколения в г. Красноярск (ООО «Эммануил») [138]. Блоки представляли собой трехслойную железобетонную панель из бетона марок М 1000-2000. Лицевые наружный и внутренний слои были выполнены из высокопрочного реакционно-порошкового бетона. На рис. 4.1 показана наружная отделка: фасадная часть стеновых крупноформатных блоков. Она изготовлена из глянцевого цветного архитектурно-декоративного высокопрочного реакционно-порошкового фибробетона с бесцветным прозрачным защитным покрытием. Внутри блоков находится утеплитель – минеральная вата плотностью 80-100 кг/м<sup>3</sup>. Квадратный метр такой панели весит всего 120-130 кг, в то время как квадратный метр традиционной стены толщиной 50 см из полнотелого кирпича весит не менее 800 кг. Это позволило значительно повысить экономику производства, снизить материалоемкость изделий, сократить трудоемкость возведения зданий, сроки строительства и массу фундамента.

Поверхность, получаемая на полимерных формах, не является окончательной и требует нанесения дополнительного защитного бесцветного покрытия. Как правило, для этого используется поверхностная гидрофобизация,

которая значительно повышает долговечность покрытия, защищает от атмосферных воздействий, предотвращает появление высолов и сохраняет глянцевую поверхность и насыщенный первоначальный цвет.



Рис. 4.1 Фасадная часть стеновых крупноформатных блоков с высокоглянцевой поверхностью из цветного архитектурно-декоративного высокопрочного бетона нового поколения

#### **4.1.2 Формирование мозаичных декоративных поверхностей под текстуру шлифованного природного камня из горных пород**

В России в последние годы получило широкое распространение использование декоративных плит шлифованного и полированного природного камня для внутренней отделки помещений. Благодаря шлифовке и полировке получаются идеально ровные и глянцевые поверхности. В связи с этим нами была изучена возможность получения аналогичных результатов на архитектурно-декоративных бетонах нового поколения.

Образование мозаичной поверхности под текстуру шлифованного природного камня было осуществлено на бетоне, изготовленном из гранитной каменной муки, тонкого гранитного песка и гранитного песка заполнителя.

Образцы подвергались шлифованию и полированию. В результате было установлено, что энергозатраты на шлифование и полирование поверхности с включением зернистого гранита значительно выше, чем при шлифовании



гранитной плиты. Это связано с тем, что цементный камень высокопрочного и сверхвысокопрочного бетона полируется очень плохо. Кроме того, полированная поверхность архитектурно-декоративного бетона имеет меньший коэффициент отражения, чем у полированных каменных пород, хотя твердость цементного камня значительно ниже, чем у гранита.

Внешний вид образцов с полированной поверхностью представлен на рис. 4.2



Рис.4.2 Внешний вид образцов архитектурно-декоративного бетона с полированной поверхностью

#### **4.1.3 Формирование выпуклых и вогнутых декоративных поверхностей с использованием «игры света и тени»**

Свойства самоуплотняющегося бетона нового поколения в силу его высоких реотехнологических показателей позволили нам воплотить в реальность идею по созданию декоративных поверхностей с выпуклыми и вогнутыми элементами с использованием «игры света и тени». На создание такого типа видоизменяющейся поверхности архитектурно-декоративного бетона нас вдохновил уникальный по своему восприятию проект фасада музея Форарльберга (Vorarlberg Museum) в г.Брегенц (Германия), разработанный архитектурным бюро Bueros Cukrowicz Nachbaur Architekten. Проект фасада представляет собой бетонный рельеф площадью 1300 м<sup>2</sup> с гладкой бесшовной поверхностью, на которой выступают декоративные элементы, получившие

название «цветки из бетона» [12]. Такая отделка меняет свою декорацию в солнечную погоду каждый час от восхода солнца до полудня. С полудня до заката декоративность поверхности повторяется с изменением в противоположном направлении тени. Такой вид отделки позволил нам классифицировать его как «игру света и тени».

Этот метод декорирования фасадов, предложенный за рубежом, актуален в солнечную погоду в дневное время, причем наибольший визуальный эффект характерен для поверхностей, обращенных на южную сторону. Нами предложено решение расширить декоративные возможности такой поверхности, проявляющиеся в дневное время, на вечернее и ночное время. Решение заключается в организации искусственного освещения несколькими направленными источниками света, расположенными под разными углами к поверхности по разные стороны от нее. Включая источники освещения с разных сторон с определенной периодичностью, можно достичь уникального визуального эффекта – «игры света и тени».

Аналогичным образом «игра света и тени» получается на декоративной поверхности за счет тупиковых (конических, цилиндрических, квадратных и т.д.) углублений различных размеров.

Для наглядного восприятия поверхности нами были выполнены фрагменты декоративной отделки с эффектом «игры света и тени», которые показаны на рис. 4.3

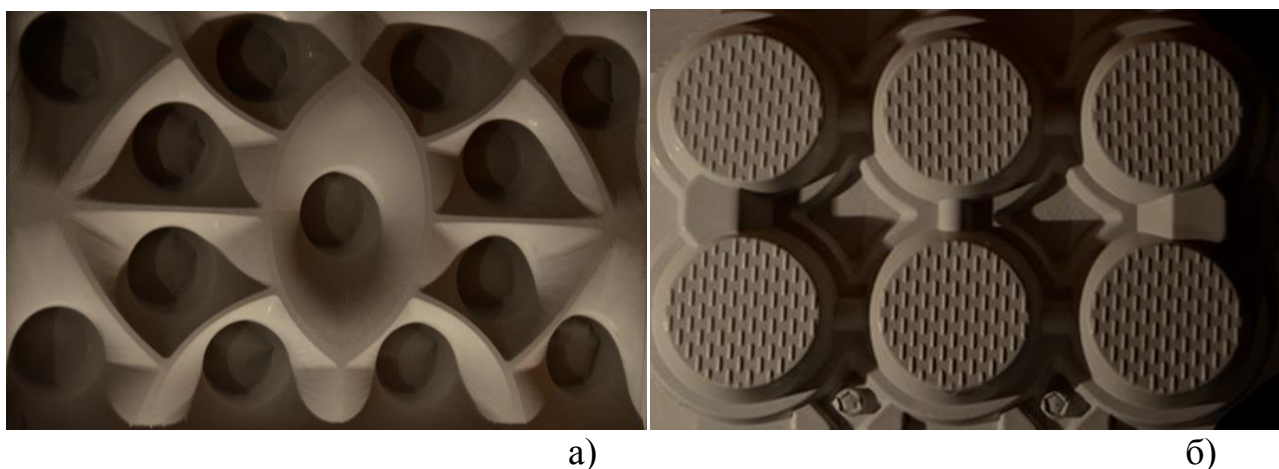


Рис.4.3 Поверхность бетона с использованием «игры света и тени»  
а) поверхность с углублениями; б) поверхность с выступами

#### 4.1.4 Формирование поверхности с визуализацией графических изображений

Наиболее интересной с точки зрения дизайнерских возможностей является технология получения графических изображений на поверхности бетона. Данная технология позволяет формировать на поверхности архитектурных бетонов абсолютно любые изображения различных конфигураций, цвета и форм. Эта технология изобретена и запатентована финским дизайнером Самули Нааманка в 2008 г. Сегодня в ряде высокотехнологично развитых стран (Япония, Германия, Канада и др.) способ формирования поверхности архитектурно-декоративных бетонов с визуализацией графических изображений получает все большее распространение. В первую очередь это касается производства стеновых панелей и декоративных панно. В европейских странах этот способ формирования декоративной поверхности часто применяют для создания логотипов компаний на фасадах зданий [61,156].

Суть метода заключается в том, что в форму укладывают пластиковую или магнитную пленку, предварительно нанеся шаблон изображения составами замедлителя схватывания цементного камня. После выдержки изделия пленку снимают, а несхватившийся слой бетона обрабатывают струей воды высокого давления. В результате этого по границам замедлителя схватывания возникает сочетание различных оттенков и изменение визуальных и тактильных свойств поверхности с минимальной шириной линий 2-3 мм (рис. 4.4).



Рис.4.4 Поверхность бетона с визуализацией графических изображений

Учитывая экономичность и простоту использования данной технологии, мы рекомендуем применять ее для производства архитектурно-декоративных стеновых панелей, а также в интерьере для оформления стен, полов и потолка.

#### **4.1.5 Формирование поверхности с имитацией фактуры и текстуры натурального камня**

Для создания долговечных скульптур, памятников культуры и архитектуры, как правило, используют натуральный камень. Чаще всего в качестве такого материала выступает гранит. Структурно-текстурная особенность натурального камня придает поверхности изделия особый колорит. Кроме этого, считается, что по своим физико-техническим и эксплуатационным показателям натуральный камень на порядок выше искусственных материалов, в частности архитектурных бетонов. Действительно, природные каменные материалы имеют достаточно высокую степень долговечности. Но формообразование и формирование поверхности изделия из натурального каменного материала – процесс крайне дорогой и очень трудо- и энергозатратный. В связи с этим нами ставилась цель разработать методику формирования поверхности экономичного долговечного архитектурно-декоративного бетона с поверхностью, имитирующей натуральный камень без дополнительной механической обработки (шлифовки поверхности).

Для этого нами был разработан специальный состав архитектурно-декоративного самоуплотняющегося бетона с использованием отходов промышленности и камнедробления. В качестве сырьевых материалов в научных экспериментах использовали: Египетский портландцемент (белый) марки 600 Д0, в качестве каменной муки ( $P_M$ ) – микрокварц, размолотый до удельной поверхности  $3400 \text{ см}^2/\text{г}$ . В качестве тонкого песка ( $P_T$ ) и песка заполнителя ( $P_3$ ) использовали фракции 0,16-0,63 мм и 0,63-5 мм соответственно из отсевов камнедробления гранита. Для придания структурно-текстурной поверхности, имитирующей гранит, использовали купершлак. В качестве пластифицирующей добавки применяли гиперпластификатор Melflux 1641 F в количестве 0,9% от массы цемента. Для получения поверхности с

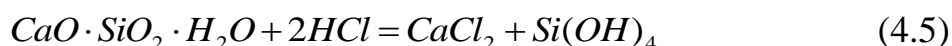
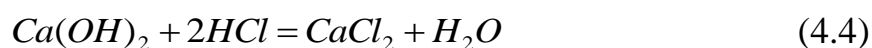


имитацией под розовый гранит использовали красный железистоокисный пигмент в количестве 2 % от массы цемента.

Прочность на осевое сжатие бетона на 1-е сутки твердения составила 34 МПа, а через 28 суток твердения – 82 МПа.

Бетонная смесь заливалась в полимерные формы. После выдержки в течении 28 суток в нормально влажностных условиях изделия расформовывались и их поверхность травилась раствором соляной кислоты и промывалась водой. В результате этого на поверхности бетона обнажались частицы гранита и купершлака (рис 4.5).

В основе метода лежат химические реакции между соляной кислотой и новообразованиями цементного камня, в основном, между гидратной известью и гидросиликатами кальция:



В результате образуется высокорастворимый хлорид кальция, который легко смывается с поверхности водой.

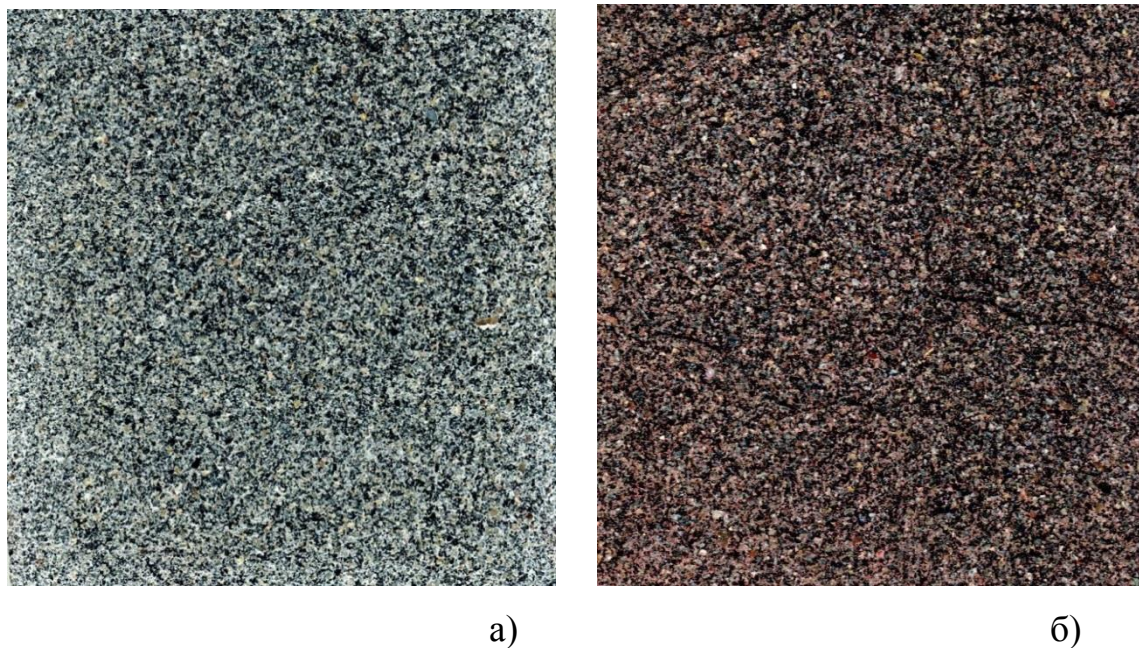


Рис.4.5 Поверхность бетона, имитирующая гранит:  
а) – серый гранит; б) розовый гранит

Таким образом, нами был получен дешевый долговечный архитектурно-

декоративный бетон, поверхность которого визуалью мало чем отличается от гранита. Полученный результат позволяет утверждать, что, меняя сырьевые компоненты бетонной смеси, можно получать архитектурные бетоны, имитирующие поверхность абсолютно любых природных каменных материалов, а применение пигментов при различных дозировках позволяет получать фактуру поверхности под натуральный камень разнообразного цвета. Применение самоуплотняющегося порошково-активированного бетона нового поколения в качестве основы для архитектурно-декоративного бетона позволит получать изделия абсолютно любой конфигурации, размера и формы. Поэтому с точки зрения экономической, экологической и технологической эффективности предложенный метод крайне целесообразен при изготовлении материалов и изделий, в том числе объемно-окрашенных, имитирующих природный камень.

Для формообразования поверхности с имитацией под натуральный камень также используется пескоструйная обработка. Однако качество поверхности при этом получается значительно ниже, с наличием блеклых вкраплений в неровностях гранитного заполнителя.

Сравнение экономической эффективности метода травления и пескоструйной обработки нами не осуществлялось. Но в производственных условиях выбор того или иного метода может быть объективно экономически обоснован исходя из энергетических затрат и стоимости раствора HCl и песка для пескоструйной обработки.

Стоит отметить, что предложенные в наших исследованиях методы не являются окончательными, учитывая образование высолов со временем не только на поверхностях бетонов старого поколения, но и на бетонах нового поколения. Конечным процессом, сохраняющим на целый ряд лет декоративные свойства поверхностей, является гидрофобная обработка. Практический опыт компании «Систром» по производству декоративных бетонов для ландшафтной архитектуры свидетельствует о потере декоративных свойств архитектурных бетонов в условиях окружающей среды. Поэтому

гидрофобизация является важнейшим условием сохранения этих свойств. Эффективность гидрофобных архитектурно-декоративных бетонов изучена в наших исследованиях.

#### **4.2 Изучение влияния порошковых гидрофобизаторов на реологические свойства бетонной смеси, на прочность и водонасыщение архитектурно-декоративных бетонов нового поколения**

Водопоглощение по массе является одним из важнейших свойств бетона, даже если речь идет не только о бетонах для общестроительного назначения, но и о архитектурно-декоративных бетонах, для которых оно наиболее важно в связи с возможностью образования высолов. От численного значения водопоглощения бетона зависят и другие основные физико-технические показатели, такие, как морозостойкость, коррозионная стойкость, деформационные характеристики.

Гелевые и капиллярные поры образуют открытую пористую систему в бетоне, и эти поры в процессе эксплуатации при воздействии дождя постепенно заполняются водой.

Водопоглощение бетонов старого поколения с высоким расходом цемента на единицу прочности находится в пределах 4-8 %, а водопоглощение по объему – 9-19 %.

Снижения водопоглощения бетона можно достичь уменьшением В/Ц (В/Т) с оптимизированным подбором компонентов. В данном случае это – высокоэффективный самоуплотняющийся бетон. Но иногда даже бетонам с высокой плотностью и прочностью необходима защита от воздействия воды (косой проливной дождь в течение нескольких дней или кратковременный косой дождь). Для архитектурно-декоративных бетонов повышенное значение водопоглощения может стать причиной для появления на их поверхностях высолов, что значительно ухудшит их эстетические характеристики и станет причиной для быстрого разрушения поверхностного слоя.

Повысить водоотталкивающие свойства архитектурно-декоративного бетона можно, применяя современные эффективные гидрофобизаторы.

В данном параграфе приводятся результаты научных исследований по выявлению эффективности водоотталкивающих свойств архитектурно-декоративных бетонов с применением структурной гидрофобизации – введением в смесь высокодисперсного порошкообразного гидрофобизатора – металлоорганического гидрофобизатора – стеарата цинка. Были исследованы реотехнологические показатели пластифицированных систем с различными металлоорганическими гидрофобизаторами. Кроме того, были изучены прочностные характеристики гидрофобизированного архитектурно-декоративного бетона.

Эффективность стеаратов и олеатов металлов была изучена на бетонах на основе минерально-шлаковых вяжущих из смеси шлака и тонкомолотых горных пород. Горные породы были представлены известняком, глиной, гранитом, песчаником [28]. В этих экспериментах сухие порошки стеаратов совместно размалывались с зернистыми породами. При помоле с абразивными породами до  $S_{уд} = 3000-4000 \text{ см}^2/\text{г}$  мягкие порошки стеаратов перетирались до нанометрического размера. Результаты показывают, что металлоорганический гидрофобизатор в бетонах значительно понижает водопоглощение и капиллярное водонасыщение бетонов как в начальные сроки, так и в более длительные сроки нахождения образцов в воде. Отмечено незначительное понижение прочности на сжатие образцов минерально-шлакового бетона с использованием стеарата цинка. Высокие гидрофобные свойства стеарата цинка также были получены на растворах на цементном вяжущем [155]. Таким образом, в результате аналитического обзора литературы мы выявили, что наиболее эффективным среди металлоорганических гидрофобизаторов является стеарат цинка. Это было характерно для минерально-шлакового бетона и цементного бетона старого поколения. При создании архитектурно-декоративных порошковых и порошково-активированных бетонов нового поколения основой качества и эксплуатационной долговечности является «высокая» реология. Поэтому на первоначальном этапе исследований с целью выбора наиболее эффективного металлоорганического гидрофобизатора было



изучено влияние различных стеаратов металлов на реотехнологические показатели тонкодисперсной системы «цемент – каменная мука». Для исследований была выбрана композиция «цемент – мраморная мука» в соотношении 70:30. В качестве пластифицирующих добавок использовали гиперпластификаторы нового поколения на поликарбоксилатной основе в количестве 1% от массы цемента: отечественный Хедитал 9γ и немецкий пластификатор Melflux 5581F. Суперпластификаторы вводились с водой затворения. Для экономии материала и времени проведения эксперимента при предварительной оценке реотехнологических свойств суспензий применяли малый вискозиметр Суттарда диаметром 10 мм высотой 40 мм (глава 2.2). В качестве металлоорганических гидрофобизаторов использовали: стеарат цинка, стеарат кальция и стеарат марганца в количестве 1% от массы цемента. Характеристики и основные физико-химические свойства порошковых гидрофобизаторов приведены в табл. 2.8 главы 2. Цемент и порошки гидрофобизаторов порционно, начиная с малых доз цемента, смешивались с 1% стеарата пересыпанием на полиэтиленовой пленке. Полученная смесь однородно перемешивалась с мраморной мукой. Результаты влияния стеаратов металлов на подвижность пластифицированных систем представлены в табл.4.1

Таблица 4.1

Влияние стеаратов металлов на изменение значений В/Т пластифицированных суспензий «цемент – мука» в зависимости от вида пластификатора

Состав композиции и количество компонентов, %	Вид СП, содержание 1% от массы сухих компонентов	В/Т	Распływ, Д, мм
Цемент Египетский 70% Мраморная мука 30%	-	0,51	30
	Хедитал 9γ	0,189	35
	Melflux 5581F	0,168	34
Цемент Египетский 70% Мраморная мука 30% Стеарат Са 1% от цемента	-	0,55	30
	Хедитал 9γ	0,201	36
	Melflux 5581F	0,189	37
Цемент Египетский 70% Мраморная мука 30% Стеарат Zn 1% от цемента	-	1,48	30
	Хедитал 9γ	0,220	35
	Melflux 5581F	0,200	34
Цемент Египетский 70% Мраморная мука 30% Стеарат Mn 1% от цемента	-	0,58	30
	Хедитал 9γ	0,201	36
	Melflux 5581F	0,190	36

Из анализа табличных значений следует, что введение стеаратов металлов в водную суспензию «цемент – мраморная мука» значительно увеличивает В/Т только при добавлении стеарата цинка (с 0,51 до 1,48). При введении двух других модификаторов это значение повышается незначительно, в среднем на 8-12%. В пластифицированных суспензиях отмечено повышение В/Т при введении всех исследуемых стеаратов, независимо от вида пластифицирующей добавки. Стоит отметить, что в этом случае значение В/Т суспензии со стеаратом цинка мало отличается от аналогичных показателей при использовании стеарата кальция и стеарата магния, что свидетельствует о высоком значении  $V_{\text{э}}$  стеарата цинка. Эти расхождения составляют при использовании ГП Melflux 5581F – 9%, при – ГП Хидетал 9γ – 5%. На рис. 4.6 представлены значения водоредуцирующих эффектов суспензий с различными металлоорганическими модификаторами.

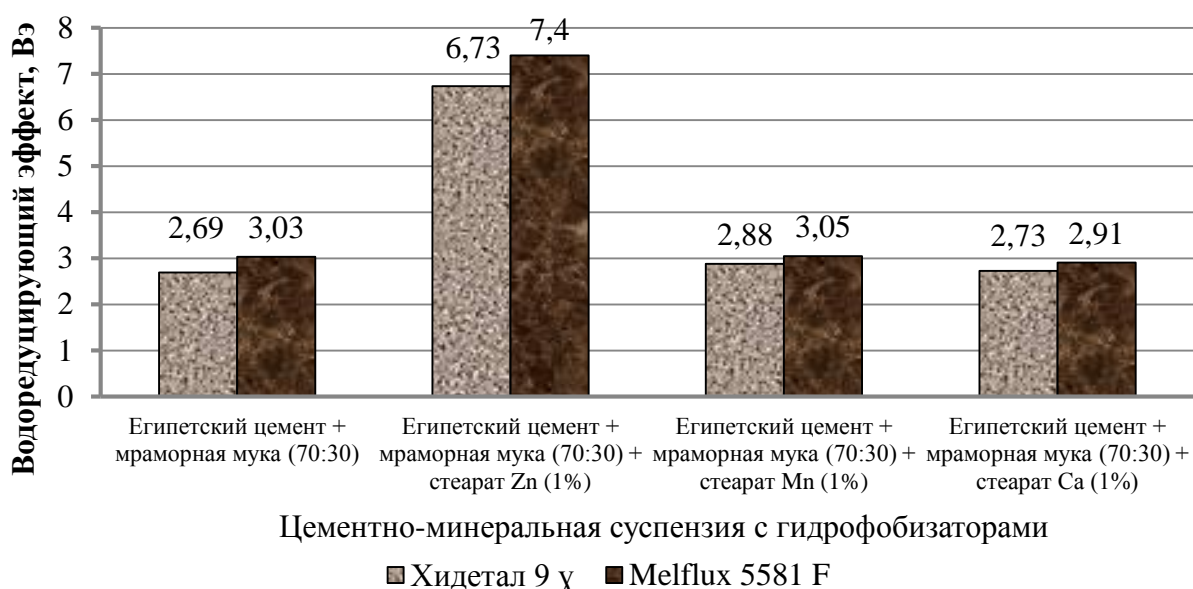


Рис. 4.6 Значения водоредуцирующего эффекта суспензий «цемент – дисперсный наполнитель – стеарат металла»

В целом исследования показали, что при введении в состав водно-дисперсной реологической матрицы металлоорганических модификаторов водопотребность пластифицированной системы значительно повышается. Причем на всех трех стеаратах этот показатель не превышает 15-20%. Основываясь на результатах ранее выполненных работ [28,155] и исследований

влияния металлоорганических гидрофобизаторов на реотехнологические показатели водно-дисперсной матрицы, в качестве порошкового гидрофобизатора в дальнейших исследованиях нами был выбран стеарат цинка.

На втором этапе исследований изучалась эффективность водоотталкивающих свойств с применением структурной гидрофобизации, а также были изучены прочностные характеристики гидрофобизированного архитектурно-декоративного бетона.

В качестве сырьевых материалов в научных экспериментах использовали: Вольский портландцемент марки 500 Д0 (СЕМ 42,5), в качестве каменной муки (П<sub>М</sub>) – гранит, размолотый до удельной поверхности 3700 см<sup>2</sup>/г. В качестве тонкого песка (П<sub>Т</sub>) фракции 0,16-0,63 мм – дробленный гранитный песок, в качестве песка заполнителя (П<sub>З</sub>) использовали также гранитный песок фракции 0,63-2,5 мм. В качестве пластифицирующей добавки применяли гиперпластификатор Melflux 5591 F в количестве 1% от массы цемента (Ц). В качестве гидрофобизатора – стеарат цинка в количестве 1% от массы цемента. Для удешевления и упрощения технологии введения порошкового гидрофобизатора мы решили однородно смешать его с цементом, без дополнительного длительного помола. Порошковый гидрофобизатор кратковременно перемешивался совместно с цементом в лабораторной мельнице в течение 15 минут для однородного распределения порошковой добавки в смеси. Полученная смесь совместно перемешивалась с остальными компонентами смеси до образования однородной консистенции.

Образцы бетона твердели в нормальных условиях в течение 28 суток. Во время твердения часть образцов испытывалась на 1-е, 7-е и 28-е сутки. После этого проводили испытание на водопоглощение в течение 90 суток и на капиллярный подсос в течение 7 суток.

Реотехнологические показатели бетонной смеси – расплыв из конуса Хегерманна и расплыв из малого конуса – обеспечивались оптимальными рецептурными параметрами: отношением дисперсных наполнителей и зернистых заполнителей к цементу. При оптимальных соотношениях

безразмерных рецептурных параметров объемное содержание условной водно-дисперсной суспензионной составляющей было равно 57,1%, объемное содержание условной воднодисперсно-тонкозернистой составляющей – 83,4%. Термин «условный» обозначает, что условно вся вода затворения в расчетах объемов принимается на образование суспензий. В действительности часть воды расходуется на смачивание тонкого песка и песка-заполнителя. Поэтому при очень низком В/Ц бетонная смесь становится самоуплотняющейся. Таким образом, микротехнологии являются основным базисом получения высокопрочных бетонов.

Основные физико-технические свойства и реологические критерии архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона контрольного состава приведены в табл. 4.2, а гидрофобизированного – в табл. 4.3

Таблица 4.2

Физико-технические свойства и реологические критерии архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона (ПАПБ-1)

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>М</sub> / Ц	Π <sub>Т</sub> / Ц	Π <sub>З</sub> / Ц	Прочность МПа, через, сут.		
								1	7	28
Портландцемент Вольский 500 Д0 СЕМ 42,5	700	225,8	0,315	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =53	R <sub>сж</sub> =97	R <sub>сж</sub> =108
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2437	$\frac{\sum \Pi}{Ц} = 2,1$					
Гранит молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	107,9	0,101	ρ <sub>теор</sub>	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>ВД</sup> = 2,22 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>ВДТ</sup> = 4,80			Ц <sub>Р<sub>с</sub></sub> <sup>УД</sup> = 6,48кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>УД</sup> = 0,15МПа/кг Ц <sub>Р<sub>и</sub></sub> <sup>УД</sup> = 40,4 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,2		
Песок тонкий гранитный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		K <sub>уп</sub>						
Песок крупный гранитный (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169		0,997	C <sub>вд</sub> = 57,1 %					
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—		Расплав конуса Хегерманна 32 см, Расплав K <sub>М</sub> 46,5 см		V <sub>вдт</sub> = 812				
ΣV <sub>сух.</sub>	—	759,9			C <sub>вдт</sub> = 82,7%					
Вода	221,1	221,1			C <sub>ТВ</sub> <sup>В</sup> = 77,4 %					
M <sub>б.с.</sub>	2398,1	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	981								

Соотношение всех компонентов смеси было одинаковым. Полученные результаты показывают, что металлоорганический гидрофобизатор – стеарат цинка – несколько загущает бетонную смесь. Так, расплыв смеси по конусу Хагерманна негидрофобизированного состава (ПАПБ-1) равен 32 см, а с гидрофобизатором (ПАПБ-13) – 21 см. Такое загущение смеси связано с низкой смачиваемостью стеаратов, перекрывающих поверхность минеральных частиц, и наличием вовлеченного воздуха. Для увеличения расплыва смеси необходимо было незначительно увеличить В/Т.

Таблица 4.3

Физико-технические свойства и реологические критерии гидрофобного архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона (ПАПБ-13)

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>м</sub> Ц	Π <sub>т</sub> Ц	Π <sub>з</sub> Ц	Прочность МПа, через, сут.						
								1	7	28				
Портландцемент Вольский 500 Д0 СЕМ 42,5	700	225,8	0,333	ρ <sub>вл</sub> 1 сутки	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> = 24	R <sub>сж</sub> = 64	R <sub>сж</sub> = 84				
Стеарат Zn 1% от Ц	7	3,9		2312							Σ Π Ц = 2,1	R <sub>из</sub> = 5,4	R <sub>из</sub> = 10,1	R <sub>из</sub> = 13,9
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4												
Гранит молотый (Π <sub>м</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	107,9	0,107	ρ <sub>геор</sub>	I <sub>Π<sub>т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,29			Ц <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> = 8,33кг/МПа;						
Песок тонкий гранитный (Π <sub>т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		2424	I <sub>Π<sub>з</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,9									
Песок крупный гранитный (Π <sub>з</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	169		K <sub>уп</sub>	V <sub>вд</sub> = 576,3									
ΣM <sub>сух.</sub>	2184	—		0,953	C <sub>вд</sub> = 57,8 %									
ΣV <sub>сух.</sub>	—	763,8	Расплыв конуса Хегерманна 21 см, Расплыв K <sub>м</sub> 29,5 см	V <sub>вдт</sub> = 828,1			R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,12МПа/кг							
Вода	233,3	233,3		C <sub>вдт</sub> = 83,0 %			Ц <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 50,3кг/МПа							
M <sub>б.с.</sub>	2417,3	—		C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 76,6 %			R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,04							
V <sub>б.с.</sub>	—	997,1												

Введение стеарата цинка в архитектурно-декоративный бетон существенно уменьшило показатели прочности в начальные сроки твердения образцов в нормальных условиях. Прочностные показатели у гидрофобизированного

бетона оказались на 23 % ниже, чем контрольного. Такое заметное снижение прочности у бетона с порошкообразным стеаратом цинка связано с понижением плотности с 2437 кг/м<sup>3</sup> до 2312 кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 4.2 и табл. 4.3).

Несмотря на понижение прочностных показателей архитектурно-декоративного гидрофобного порошково-активированного песчаного бетона, они все же остаются достаточно высокими.

Водопоглощение по массе гидрофобизированных образцов архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона в первые часы насыщения образцов в воде низкое и составляет 0,68 %, что в 2,3 раза ниже контрольного состава (1,61 %). Водопоглощение гидрофобизированного бетона на 3-и сутки было 2,29 %, что также ниже контрольного состава в 1,22 раза. Значения водопоглощения гидрофобизированных составов становятся равными значениям контрольного состава через 22 суток. Можно отметить, что гидрофобный эффект гидрофобизированных составов сохраняется до 21 суток. При более длительном нахождении образцов в воде до 3 месяцев гидрофобный эффект уменьшается и составы с гидрофобизатором насыщают 3,9 % воды по массе за счет более высокой пористости (рис.4.7).

Принятый состав бетона, в котором три основных компонента представлены гранитом – гранитная мука, тонкий гранитный песок и песок-заполнитель, которые составляют 67 % по массе от всех сухих компонентов бетона, открывает широкие возможности для производства и реализации таких компонентов на горных выработках и карьерах диарита, сиенита, диабазы, базальта и т.п. Широкое применение их позволит создавать не только декоративные бетоны, но и высокопрочные и долговечные песчаные бетоны.

На следующем этапе исследований было изучено капиллярное водонасыщение разработанного архитектурно-декоративного бетона (рис.4.8).

Капиллярный подсос определяли в соответствии с EN 1015–18:2002 на балочках 40×40×160 мм, установленных в воду вертикально на глубину 7 мм. В течение одной недели производили наблюдение за высотой подъема воды по перемещению границы смачивания образцов и изменением их массы.

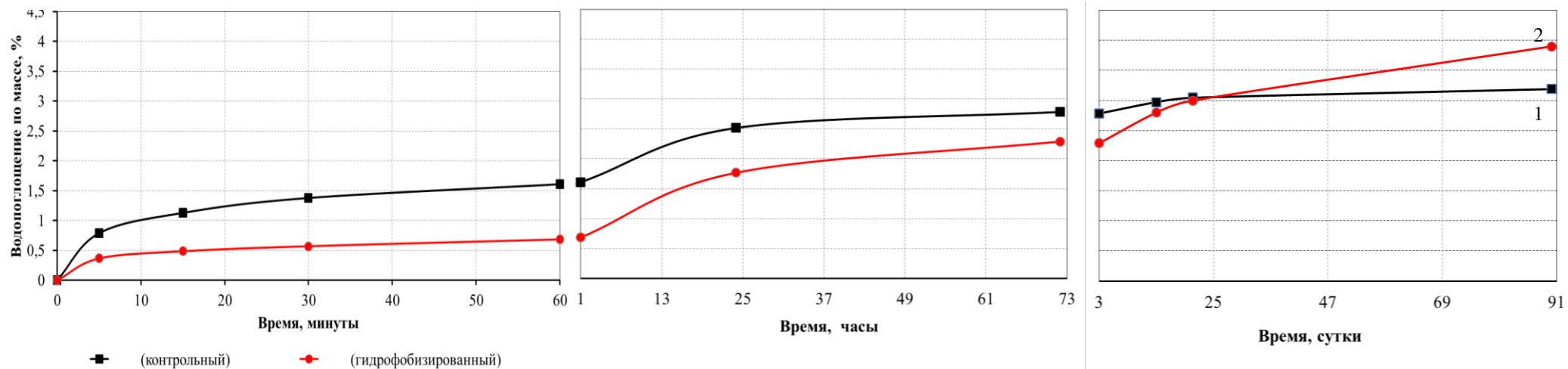


Рис. 4.7. Водопоглощение по массе архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона:

**1** – контрольный негидрофобизированный состав (ПАПБ-1);

**2** – гидрофобизированный стеаратом цинка 1% от массы цемента (ПАПБ-13)

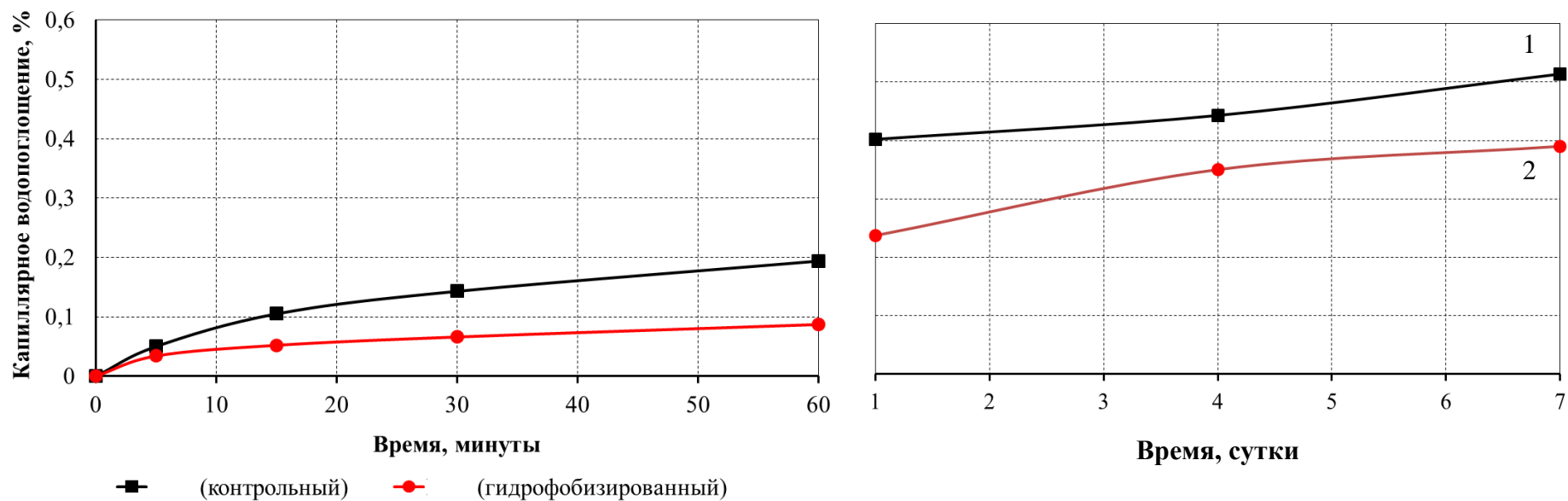


Рис. 4.8. Капиллярное водонасыщение архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона:

**1** – контрольный негидрофобизированный состав (ПАПБ-1);

**2** – гидрофобизированный стеаратом цинка 1% от массы цемента (ПАПБ-13)



Показано, что стеарат цинка значительно уменьшает капиллярное всасывание образцов бетона в первые минуты и часы экспонирования образцов воде.

Так, капиллярное водонасыщение гидрофобизированных образцов через 15 минут нахождения образцов воде стало в 2 раза ниже значений водопоглощения по массе контрольного состава (0,1 %) и составило 0,052%. Значение капиллярного подсоса гидрофобного состава через неделю было ниже значения контрольного состава в 1,3 раза. В целом можно отметить, что значения капиллярного подсоса как контрольного, так и гидрофобного составов очень малы.

В процессе капиллярного подсоса бетона контрольного состава отмечено, что к седьмым суткам высота подъема жидкости по капиллярам находится в пределах 6-8 % от высоты образцов-балочек. На балочках с гидрофобизатором высота подъема составила 3,7-4 % от высоты образца, равной 160 мм.

В ходе капиллярного подсоса в течение недели отмечено полное отсутствие высолообразования на поверхности гидрофобизированных декоративно-отделочных бетонов.

Проведенные исследования по объемной гидрофобизации бетонов порошкообразным стеаратом цинка не позволили получить высоких результатов по гидрофобизации. В связи с этим необходимо было изучить поверхностные способы гидрофобизации, при использовании которых не затрагивается изменение растекаемости самоуплотняющихся бетонов и их прочностных показателей.

#### **4.3. Изучение влияния поверхностной гидрофобизации на свойства архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов**

Поверхность бетонных изделий подвержена высолообразованию. Даже низкое капиллярное водопоглощение бетонов нового поколения никак не исключает диффузию атмосферных осадков в поры бетона. Влага, попадая в капиллярную систему бетона, начинает мигрировать по микропорам,

впоследствии выносятся солевые растворы, оставляют на поверхности высолы. Результаты такого негативного воздействия через 2-3 месяца становятся видны невооруженным глазом. При этом ухудшается эстетическое восприятие архитектурно-декоративных бетонов.

Высокоплотная структура разработанных нами бетонов достигается путем создания оптимально подобранных дисперсных компонентов, тонкого песка и песка заполнителя. Но и для таких бетонов следует создать надежную гидрофобную защиту декоративно-отделочной поверхности от непосредственного контакта с водной средой для сохранения цветовой гаммы поверхности и продления срока службы декоративных бетонов. Таких результатов можно достичь эффективной поверхностной гидрофобизацией.

В качестве сырьевых материалов в научных экспериментах использовали: Египетский портландцемент (белый СЕМ 52,5), в качестве каменной муки ( $P_M$ ) – известняк, размолотый до удельной поверхности 3400  $cm^2/g$ . В качестве тонкого песка ( $P_T$ ) фракции 0,16-0,63 мм – известняковый песок, в качестве песка заполнителя ( $P_3$ ) использовали известняковый песок фракции 0,63-2,5 мм.

Использовалась пластифицирующая добавка – гиперпластификатор Melflux 5591 F в количестве 1% от массы цемента (Ц) и красный железистоокисный пигмент в количестве 5% от массы цемента (Ц).

Приготовление смеси осуществлялось по ранее отработанной рецептуре (глава 2, п.2.2).

Для изучения влияния масштабного фактора была изготовлена партия образцов-балочек размером 4×4×16 см. и кубов с ребром 10 см. Образцы бетона твердели во влажных условиях в течение 28 суток в двойных полиэтиленовых мешках. Во время твердения часть образцов-балочек испытывалась на прочности при сжатии и изгибе по ГОСТу на 1-е, 7-е, и 28-е сутки. После твердения измеряли водопоглощение по массе в течение 45 суток.

Основываясь на результаты ранее выполненной работы [28], для

изучения повышенной водостойкости и сохранения первоначальной поверхности разработанных декоративных бетонов нами был выбран пропитывающий силиконовый гидрофобизатор из серии «Пента».

Для нанесения на поверхность гидрофобизирующего состава приготавливали раствор «Пента-824» с «уайт-спирит» в соотношении 1:1, и полученный раствор наносили на поверхность образцов кистью или поролоновым валиком в два слоя. Время высыхания пропитанного гидрофобизатором «Пента-824» слоя составляло 12 часов. Внешний вид поверхности образцов после пропитки «Пента-824» визуально не изменялся.

Основные реологические критерии бетонных смесей и физико-технические свойства окрашенного архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона приведены в табл. 4.4.

Как следует из табл. 4.4, использование микрометрических наполнителей и заполнителей из известняка позволили при низком В/Ц, равном 0,271, получить высокую растекаемость. Содержание суспензионных дисперсной и воднодисперсно-тонкозернистой составляющих осталось таким же, как и в бетонах на гранитных наполнителях и заполнителях (см. табл.4.2).

Прочность на осевое сжатие бетона на 1-е сутки твердения составила 86 МПа, на изгиб – 12,4 МПа, а через 28 суток твердения – 138 МПа и 19,3 МПа соответственно.

В табл. 4.5 приведены результаты водопоглощения по массе гидрофобизированных и негидрофобизированных бетонных образцов разных размеров: балочек размером 40×40×160 мм и кубов с ребром 100 мм. Одновременно оценивалось влияние масштабного фактора на кинетику водопоглощения. Для анализа эффективности гидрофобизации модификатором «Пента» в табл. 4.5 представлены результаты водопоглощения по массе контрольного и гидрофобного составов окрашенного архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона.

Таблица 4.4.

**Физико-технические свойства и реологические критерии окрашенного декоративно-отделочного реакционно-порошкового суспензионного бетона (ПАПБ-20)**

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$	Прочность МПа, через, сут.		
								1	7	28
Портланд-цемент белый Египетский 600 ДО	700	225,8	0,271	ρ <sub>вл</sub> 1 сутки	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =86 R <sub>из</sub> =12,4	R <sub>сж</sub> = 120 R <sub>из</sub> = 13,9	R <sub>сж</sub> = 138 R <sub>из</sub> = 19,3
Пигмент красный Fe <sub>2</sub> O 5 % от Ц	35	6,9		2,423						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$						
Известняк молотый (П <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3400 см <sup>2</sup> /Г	300	111,1	0,085	ρ <sub>геор</sub>	I <sub>ПТ</sub> <sup>вд</sup> = 2,08 I <sub>ПЗ</sub> <sup>вдт</sup> = 4,58			Ц <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> = 5,07 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,19 МПа/кг Ц <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 36,2 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 7,15		
Песок тонкий (П <sub>Т</sub> ) известняковый, фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		2,470						
Песок крупный известняковый (П <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	174		K <sub>уп</sub>						
				0,981	V <sub>вд</sub> = 540,4 C <sub>вд</sub> = 55,5 % V <sub>вдт</sub> = 799,6 C <sub>вдт</sub> = 82,1 % C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 80,8 %					
ΣM <sub>сух.</sub>	2212	—	Распływ конуса Хегерманна 31,5 см, Распływ K <sub>М</sub> 47,5 см							
ΣV <sub>сух.</sub>	—	782,4								
Вода	189,7	189,7								
M <sub>б.с.</sub>	2401,7	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	972,1								

Полученные результаты показывают, что образцы бетона, пропитанные гидрофобизирующей жидкостью «Пента-824» в течении 2 суток нахождения их в воде показывают практически нулевые значения водопоглощения. Для образцов размером 4×4×16 см и размером 10×10×10 см водопоглощение по массе очень низкое и равно – 0,15% и 0,1%. На третьи сутки экспонирования образцов в воде водопоглощение пропитанных гидрофобных составов также остается очень низким – 0,24% и 0,17% соответственно.

Через полтора месяца водопоглощение в воде образцов контрольного состава архитектурно-декоративного бетона размером 4×4×16 см и размером 10×10×10 см равно 2,56% и 1,44% соответственно. Водопоглощение на 1 м<sup>2</sup> поверхности у контрольных составов при выдержке от 5 минут до 1 месяца находится в пределах от 67 г до 523 г соответственно.

Таблица 4.5

Водопоглощение по массе окрашенного архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона (ПАПБ-20)

Размеры образцов (см)	Водопоглощение по массе, % / в г на 1 м <sup>2</sup> поверхности											
	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
Контрольный состав												
4*4*16	0,34/ 68	0,53/ 105	0,69/ 139	0,85/ 179	1,70/ 366	1,92/ 403	2,00/ 421	2,07/ 436	2,21/ 466	2,38/ 501	2,48/ 523	2,56/ 540
10*10*10	0,16/ 67	0,25/ 100	0,33/ 133	0,41/ 166	0,83/ 333	0,95/ 383	1,03/ 416	1,08/ 433	1,20/ 483	1,32/ 533	1,40/ 550	1,48/ 566
Гидрофобный состав												
4*4*16	0/0	0,003 /0,7	0,003 /0,7	0,006 /1,4	0,09/ 21	0,15/ 31	0,24/ 50	0,31/ 65	0,41/ 86	0,75/ 165	1,45/ 304	1,68/ 353
10*10*10	0/0	0/0	0/0	0/0	0,09/ 33	0,12/ 46	0,17/ 66					

Расход гидрофобизатора на 1 м<sup>2</sup> поверхности после испарения растворителя составлял 20 г/м<sup>2</sup> поверхности. В высокопористых бетонах расход может быть значительно выше. В инструкции по применению гидрофобизирующей жидкости «Пента-824» для бетонов он составляет от 120 до 150 г/м<sup>2</sup>. Поэтому можно сделать вывод об экономической эффективности гидрофобизации плотных архитектурно-декоративных бетонов нового поколения.

Таким образом, по результатам исследований для порошковых и порошково-активированных бетонов можно рекомендовать пропитывающий

гидрофобизатор «Пента-824». Он обеспечивает низкое водопоглощение по массе декоративно-отделочного бетона, быстрое высыхание поверхностного слоя и сохранение глянца и цвета на поверхности плиток.

Установлен механизм гидрофобизации архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов. Он является поверхностно-проникающим с гидрофобизацией поверхности на определенную глубину в зависимости от пористости. Для малопористых бетонов нового поколения, в частности для исследуемых бетонов, проникающая способность раствора полимера будет значительно меньше, чем у воды. Молекулы воды имеют размер 0,28 нм. Для исследуемых бетонов установлено, что за трое суток выдержки образцов в воде приведенная толщина пленки воды на поверхности составляет 432 мкм (0,43 мм). При доступной для воды поверхностной пористости, равной 2,56 %, глубина пропитки может составлять не более 1 мм. Для гидрофобной жидкости глубина пропитки будет значительно меньше. Масса сухого действующего вещества полимера в расчете на 1 м<sup>2</sup> поверхности составила 18 г. Можно считать, что это количество гидрофобизатора распределилось на поверхности в поверхностных порах бетона. Такое чрезвычайно малое количество гидрофобизатора дает основание предполагать, что глубина проникновения молекул полимера не превышает долей миллиметра.

При исследованиях физико-технических и гигрометрических свойств цементного камня, мелкозернистых бетонов, песчаных растворов, порошковых и реакционно-порошковых бетонов при подборе составов смесей их формуют в формах-балочках 40×40×160 мм. Это позволяет значительно снизить объем бетонов по сравнению с объемами бетонов для получения образцов 100×100×100 мм. Между тем, никем не исследовались масштабные факторы по водопоглощению, массопоглощению, сорбционному увлажнению и т.п.

В 2010 году профессором В.И. Калашниковым [157] был экспериментально установлен переходной коэффициент пересчета усадки

призм 40×40×160 мм на усадочные деформации призм базового размера 100×100×100 мм. Этот коэффициент вычисляется по установленной формуле

$$K = \sqrt[3]{\left(\frac{m}{M}\right)^2}, \quad (4.6)$$

где  $m$  и  $M$  – модули поверхности малой и большой призм.

Как известно, модуль поверхности объемных фигур равен:

$$M = \frac{S}{V}, \quad (4.7)$$

где  $S$  – поверхность фигуры, см<sup>2</sup>;

$V$  – объем фигуры, см<sup>3</sup>.

Для усадки адекватных геометрических образцов-призм масштабный коэффициент равен 1,84. Расчетная усадка для призм 100×100×160 мм, вычисленная с использованием переходного коэффициента 1,84, совпадала с экспериментальной через 150 суток.

При усадке и при водопоглощении протекают диффузионные процессы: в первом случае диффузия – водяного пара из образца, а во втором – диффузия воды внутрь образца. Мы полагали, что эти процессы должны подчиняться одной зависимости (4.7). Используя эту формулу и зная модуль поверхности, вычислили коэффициент пересчета для образцов базового размера 100×100×100 мм по водопоглощению образцов-балочек 40×40×160 мм. Зная модули поверхности, равные 288 см<sup>2</sup> и 600 см<sup>2</sup> соответственно для образцов с размерами 40×40×160 мм и 100×100×100 мм, этот коэффициент пересчета по формуле (4.7) оказался равным 1,51.

В соответствии с методикой ГОСТа водопоглощение определяется через 48 или 72 часа водонасыщения на образцах 100×100×100 мм. Исходя из экспериментальных данных, водопоглощение образцов-балочек 40×40×160 мм на третьи сутки превышает водопоглощение образцов-кубов 100×100×100 мм за это же время в 1,94 раза. Поэтому наше предположение о влиянии масштабного фактора на водопоглощение в соответствии с формулой (4.7) не

оправдалось. Возможно, это связано с различием геометрических форм образцов.

Важно отметить, что экспериментальные значения водопоглощения балочек  $40 \times 40 \times 160$  мм ( $W_6$ ) и кубиков  $100 \times 100 \times 100$  мм ( $W_k$ ) при длительном водонасыщении начинают приближаться друг к другу (рис. 4.9). Так, через 45 суток водонасыщения отношение  $W_6/W_k$  становится равным 1,72. Физический смысл этого изменения связан с геометрическим различием формы образцов-кубов и балочек.

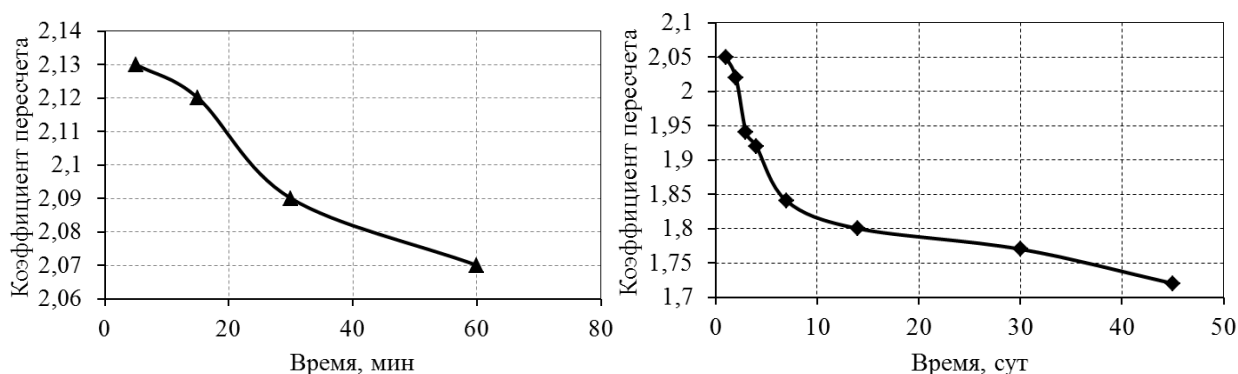


Рис. 4.9 Зависимость изменения коэффициента пересчета водопоглощения от времени экспонирования образцов в воде

Таким образом, пересчет 3-суточного водопоглощения образцов-балочек  $40 \times 40 \times 160$  мм на водопоглощение образцов-кубов  $100 \times 100 \times 100$  мм из порошково-активированного песчаного бетона необходимо осуществлять с использованием коэффициента 1,94, полученного экспериментальным методом.

#### 4.4. Водопоглощение лицевого слоя архитектурно-декоративного бетона с гидрофобной и естественной гидрофильной поверхностями различной фактуры

Результаты проведенных исследований по водопоглощению, представленные в табл. 4.5, получены после длительного экспонирования образцов в воде. Увлажнение бетонов в натуральных условиях обычно происходит под воздействием косого дождя (или таяния мокрого снега на горизонтальной поверхности). Поэтому природное увлажнение поверхности будет в несколько раз меньше, чем при постоянном нахождении в воде. Да и



продолжительность дождя редко составляет более 2-3 суток. Опаснее то, что воздействие атмосферных осадков отражается на поверхности архитектурно-декоративных бетонов, ухудшая их декоративные свойства. Примером такого ухудшения декоративных свойств при атмосферных воздействиях могут служить изделия парковой архитектуры ООО «Систром» в г. Москве. В связи с этим было важно определить водопоглощение лицевой поверхности архитектурно-декоративного бетона различной фактуры и в дальнейшем оценить его состояние после испытания на морозостойкость. При этом мы ужесточили условия водонасыщения по сравнению с водопоглощением от косого дождя. Для этого на поверхности по периферии образцов наносились борты из пластилина, и в образованную ванну заливалась вода. Таким образом, образцы с поверхности насыщались под слоем воды в течении 1-го часа. Было изготовлено четыре декоративных плитки с использованием отходов металлургии и гранитных отходов камнедробления с различной фактурой поверхности. Две плитки имели глянцевую поверхность, а две другие были подвергнуты травлению для обнажения заполнителя для имитации поверхности под натуральный гранит (п. 4.1.5). Важно было выявить не только зависимость водопоглощения от фактуры поверхности, но и изучить эффективность гидрофобизации поверхностного слоя. Поэтому две плитки, одна из которых была с глянцевой поверхностью, а другая – с поверхностью под натуральный гранит, обрабатывались за один прием гидрофобизирующим раствором «Пента-824» в уайт-спирите в соотношении 1:1. При этом степень отражающей способности у гидрофобизированной и негидрофобизированной поверхности после высыхания визуально отличалась незначительно.

По собственно разработанной методике (п.2.2) было изучено водопоглощение лицевой поверхности архитектурно-декоративного бетона (рис. 4.10).

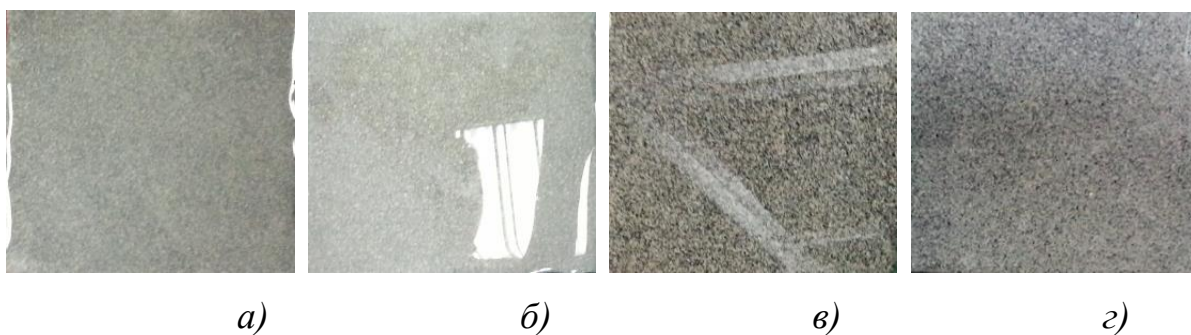


Рис. 4.10 Поверхность лицевого слоя архитектурно-декоративного бетона с различной фактурой в момент исследования водопоглощения:

- а)* глянцевая негидрофобная; *б)* глянцевая гидрофобная;  
*в)* травленая негидрофобная; *з)* травленая гидрофобная

После одного часа насыщения водой гидрофобизированная поверхность не изменила свой цвет по сравнению с исходной, не подвергнутой водопоглощению (б, г). Влажные поверхности плиток, не обработанные гидрофобным раствором, становятся после удаления воды значительно темнее, что объясняется насыщением их водой (а, в). Это характерно как для глянцевой, так и для травленной поверхностей. В результате испытания было отмечено появление высолов после высыхания поверхности лишь на глянцевой негидрофобной плитке. На плитках, обработанных гидрофобным составом, изменений относительно первоначального вида поверхности не обнаружено. Интересен факт сохранения первоначального вида поверхности травленной негидрофобизированной плитки. Вероятно, это связано с тем, что значительная часть травленной поверхности занята обнаженным заполнителем, и пленка карбоната кальция или извести на малой дискретной поверхности, занятой цементным камнем, зрительно не воспринимается.

Полученные значения водопоглощения были пересчитаны на  $1 \text{ м}^2$  поверхности. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.6

Водопоглощение по массе лицевого слоя  
архитектурно-декоративного бетона с различной фактурой поверхности

Вид поверхности	Водопоглощение по массе, % и в г на 1 м <sup>2</sup> поверхности				
	Единица измерения	Время воздействия			
		5 мин	15 мин	30 мин	60 мин
Глянцевая негидрофобная	%	0,06	0,11	0,15	0,17
	г/м <sup>2</sup>	27	50	68	77
Глянцевая гидрофобная	%	0,03	0,04	0,049	0,052
	г/м <sup>2</sup>	16	21	26	27
Травленая негидрофобная	%	0,15	0,17	0,18	0,20
	г/м <sup>2</sup>	74	82	88	99
Травленая гидрофобная	%	0,063	0,063	0,066	0,069
	г/м <sup>2</sup>	29	29	31	32

В результате анализа табл. 4.6 было отмечено, что в начальные сроки (до 1 часа) водопоглощение по массе на негидрофобных поверхностях примерно одинаковое – 0,17% на глянцевой и 0,20% на травленой. Причем после 5 минут воздействия воды значения водопоглощения были практически в три раза меньше. Это позволяет предполагать, что при более длительном водонасыщении значения водопоглощения на различных фактурах поверхности будут стремиться к равнозначному показателю. Адекватные результаты получились при исследовании водопоглощения гидрофобных поверхностей. В свою очередь, обработка поверхности плитки гидрофобным раствором позволила снизить водопоглощение в начальные сроки в три раза, сохраняя первоначальный вид плитки с глянцевой поверхностью.

Параллельно из того же состава была изготовлена серия образцов-балочек 40×40×160 мм для определения водопоглощения бетона по ГОСТу. Ранее экспериментальным методом был получен коэффициент пересчета значений водопоглощения с образцов-балочек размерами 40×40×160 мм на

образцы-кубы с ребром 100 мм (п. 4.3). Поэтому представленные в табл. 4.7 значения водопоглощения при пересчете будут практически в два раза меньше.

Таблица 4.7

Водопоглощение по массе архитектурно-декоративного бетона с использованием гранитных отсеков камнедробления на образцах-балочках с размерами 40×40×160 мм

Водопоглощение по массе, % и в г на 1 м <sup>2</sup> поверхности						
Единица измерения	Время воздействия					
	5 мин	15 мин	30 мин	60 мин	24 часа	72 часа
%	0,46	0,72	0,90	1,13	2,43	2,58
г/м <sup>2</sup>	98	152	186	238	511	542

Полученные результаты свидетельствуют о низком значении водопоглощения по массе на третьи сутки – 2,58 % у образца-балочки, 1,4 % – у образца-куба с ребром 100 мм.

Интересно отметить, что на одном и том же составе бетона на образцах-плитках и образцах-балочках значения поглощенной воды на метр квадратный поверхности через заданное время будут значительно отличаться (см. табл.4.6 и табл.4.7). Так, максимальное поглощение воды на 1 м<sup>2</sup> поверхности у травленного негидрофобного образца-плитки после часовой выдержки в воде равно 99 г/м<sup>2</sup>. За этот же отрезок времени квадратный метр поверхности образцов-балочек поглощает количество воды, большее в два с лишним раза (238 г/м<sup>2</sup>). Это объясняется тем, что плотность нижней поверхности плитки (при формовании), которая является лицевой, всегда значительно выше средней плотности бетона.

Проведенные исследования позволили заключить, что значение водопоглощения лицевого слоя архитектурно-декоративного бетона зависит не только от фактуры, но и в значительной степени от способа формирования поверхности. Используя гидрофобные составы, в частности «Пента-824»,

можно значительно снизить водопоглощение, увеличив тем самым время сохранения декоративных свойств поверхности архитектурно-декоративного бетона, эксплуатирующегося в неблагоприятных условиях окружающей среды.

#### **Выводы по 4 главе**

1. Систематизированы классификационные критерии и предложены способы формирования поверхности архитектурно-декоративных порошково-активированных самоуплотняющихся бетонов с разнообразной фактурой и визуальным эстетическим восприятием.

2. Изучено влияние структурной и поверхностной гидрофобизации на реотехнологические, прочностные и гигрометрические показатели архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов. Показана эффективность применения поверхностной гидрофобизации для сохранения архитектурной выразительности поверхности.

3. 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.

4. Показано, что значения водопоглощения лицевого слоя архитектурно-декоративного бетона с гидрофобной и естественной гидрофильной поверхностью зависит не только от качественных показателей бетона, но и от фактуры и способа формирования декоративной поверхности.

5. Выявлено, что объемная структурная гидрофобизация нерастворимым стеаратом цинка в количестве 1% от массы цемента не позволяет получить высокие гидрофобные свойства по показателям объемного водопоглощения и капиллярного всасывания и приводит к значительному снижению темпов набора прочности в нормированные сроки твердения.

## **ГЛАВА 5. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ГИГРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ**

Благодаря современным технологиям производства архитектурно-декоративного бетона, позволяющим получать изделия с заранее заданными свойствами, он нашел широкое применение в области строительства и художественного оформления зданий и ландшафтного интерьера. Архитектурно-декоративные бетоны нового поколения обеспечивают художественную выразительность получением очень мелких точно «прорисованных» деталей декора без дополнительной обработки. Кроме того, бетоны нового поколения экологичны и лишены радиоактивного фона, присутствующего у некоторых широко применяемых природных каменных материалов. Архитектурно-декоративные бетоны в силу их универсальных свойств и высоких качественных показателей являются настоящей находкой для инженеров и дизайнеров строительной индустрии. Данная глава посвящена изучению физико-технических и гигрометрических свойств архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов с использованием многотоннажных отходов камнедробления.

### **5.1 Кинетика набора прочности на осевое сжатие архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов на различных горных породах**

На горнодобывающих предприятиях при дроблении горных пород образуется большое количество мелкофракционных отходов с размерами в пределах 0-5 мм. Ранее в литературном обзоре (глава 1) нами было показано, что в этом размерном диапазоне сосредоточена основная часть наполнителей и заполнителей, необходимых для производства всех видов бетонов нового поколения. Самая тонкая пылевидная часть таких отходов пригодна для получения каменной муки, а чуть более крупные фракции целесообразно применять для изготовления тонкого и грубого песка. С учетом наличия во многих регионах большого количества месторождений кварцевого песка, его целесообразно применять для получения каменной муки, но для российской

промышленности это нехарактерно. И при этом на многих территориях наличие средних и крупных песков сильно ограничено в связи с отсутствием в них необходимых для бетонов нового поколения фракций диаметром 0,63-5,0 мм. Поэтому применение отходов камнедробления в качестве сырьевых компонентов для бетонов нового поколения открывает широкие возможности, особенно в регионах, имеющих горнодобывающие предприятия. В этом случае использование многотоннажных отходов камнедробления является крайне эффективным, исходя из технологических, экономических, а самое главное, экологических принципов создания бетонов нового поколения.

В связи с решением комплексных задач по созданию долговечных высокофункциональных архитектурно-декоративных бетонов нами было проведено большое количество экспериментов, основанных на детальном анализе ранее выполненных работ на каф. «ТСМиД» ПГУАС по теме создания порошково-активированных и реакционно-порошковых песчаных и щебеночных бетонов [10, 20, 22, 23, 24, 25]. На данном этапе выполнения диссертационной работы задачей являлось изучение кинетики набора прочности и получение высокой нормированной прочности и долговечности порошково-активированных песчаных бетонов на основе отходов камнедробления различных горных пород.

В соответствии с ранее выполненными исследованиями по данной тематике прочность порошково-активированных бетонов зависит от гранулометрии тонкого песка, а также от его насыпной плотности в уплотненном состоянии. Прочность бетонов будет выше при условии меньшей пустотности. Учитывая наличие условных реологических матриц в бетонной смеси, водно-дисперсная реологическая матрица I рода будет раздвигать частицы песка фракций 0,16-0,63 мм по декартовым осям координат на определенные расстояния друг от друга. Согласно формуле (5.1) можно определить среднее расстояние частиц в зависимости от типа упаковки:

$$X = a \cdot d \cdot \sqrt[3]{1/C_v} - d, \quad (5.1)$$

где  $d$  – средний диаметр частиц песка;

$C_v$  – объемная концентрация песка в порошково-активированной песчаной бетонной смеси, в долях единицы;

$a$  – коэффициент, зависящий от плотности упаковки: для простой кубической с плотностью 0,523 равен 0,806; для случайной с плотностью упаковки 0,64 – 1,0; для гексагональной с плотностью 0,74 – 1,145.

Таким образом, рассчитывая среднее расстояние между поверхностями частиц тонкозернистого песка, можно подобрать оптимальную объемную концентрацию песка для получения высокоплотной самоуплотняющейся бетонной смеси. Для этого важно беспрепятственное перемещение частиц тонкого песка в реологической матрице I рода.

В связи с этим рецептура порошково-активированных бетонов нового поколения предполагает повышенное содержание дисперсной фазы (цемент – каменная мука – вода). При этом содержание каменной муки находится в диапазоне 40-130 % от массы цемента, изменяясь в зависимости от его содержания.

В соответствии с новой рецептурой формируется новая топологическая структура, в которой значительно увеличивается объем реологической матрицы, обеспечивающей высокие реотехнологические свойства бетонной смеси. В научных исследованиях [74] представлено оптимальное объемное содержание компонентов в реакционно-порошковых и порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонах, основываясь на теоретических изысканиях оптимальной топологической структуры (рис.5.1). Исходя из этого, автор предпринял попытку создания универсальной матрицы порошково-активированных бетонов с определенным объемным содержанием компонентов различного размерного уровня. В результате были получены самоуплотняющиеся бетоны на гранитной муке и мраморной муке и гранитных песках фракцией 0,16-0,63 мм и 0,63-2,5 мм соответственно, с нормированным пределом прочности на сжатие 108-110 МПа.



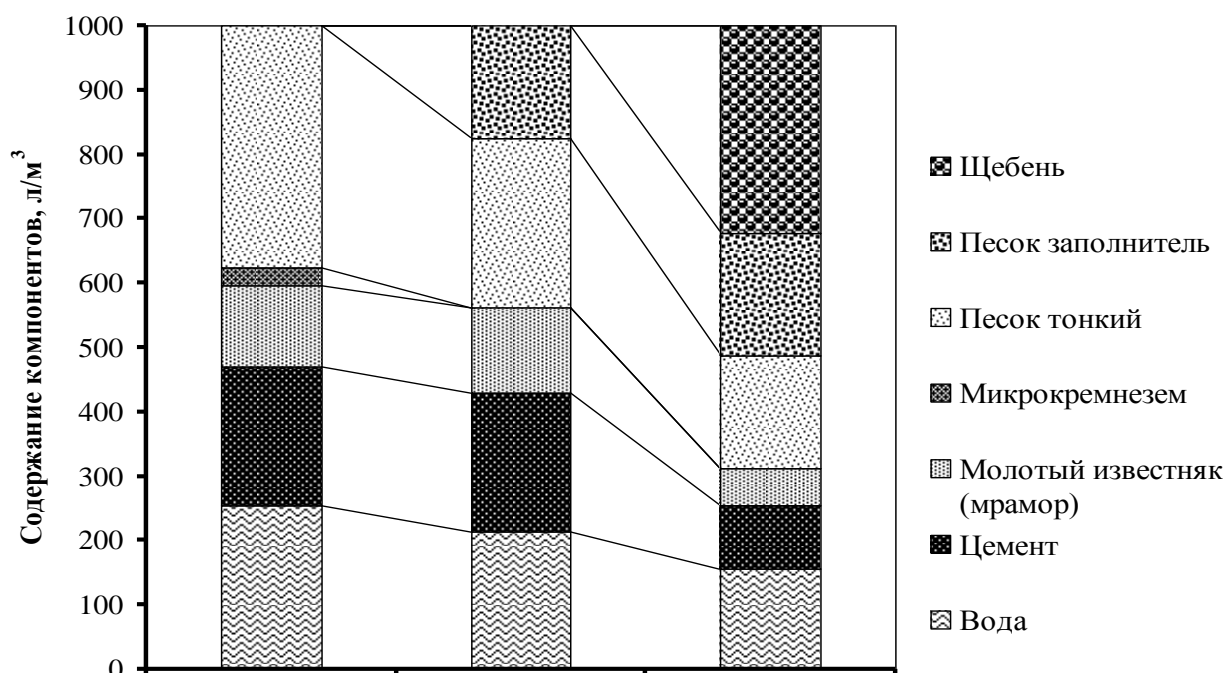


Рис. 5.1. Оптимальное объемное содержание компонентов в реакционно-порошковых и порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонах [74]

Принимая во внимание эти исследования, нами разрабатывалась рецептура бетонов с целью подбора самоуплотняющихся песчаных бетонных смесей с высокой прочностью, исходя из соотношения компонентов, путем пробных формовок. Благодаря наработке экспериментальных данных составов с близкими расходами компонентов в соответствии с оптимизацией их соотношений отбирался базовый наиболее оптимальный состав. Самые высокие прочностные показатели были достигнуты после того, как реологические матрицы были полностью оптимизированы по содержанию цемента, каменной муки и тонкого песка фракции 0,16-0,63 мм.

Таким образом, нами были подобраны составы на основе отходов камнедробления различных горных пород. Основой реологической матрицы I рода наряду с цементом выступала каменная мука. В качестве тонкозернистого песка и песка-заполнителя использовались отсеvy различных горных пород с фракциями 0,16-0,63 мм и 0,63-2,5 мм соответственно. При этом мы отказались от введения реакционно-активных микрокремнеземов, увеличивающих себестоимость бетона. Результаты исследований представлены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Физико-технические свойства и реологические критерии архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на различных горных породах

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>М</sub> Ц	Π <sub>Т</sub> Ц	Π <sub>З</sub> Ц	Прочность МПа, через, сут.			
								1	7	28	
ПАПБ-1*											
Портландцемент Вольский 500 Д0 СЕМ 42,5	700	225,8	0,315	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =53	R <sub>сж</sub> =97	R <sub>сж</sub> =108	
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2437							$\frac{\sum \Pi}{\Pi} = 2,1$
Гранит молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	107,9	0,101	ρ <sub>теор</sub>	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,22 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,80			Π <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> =6,48 кг/МПа;			
Песок тонкий гранитный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		2444							K <sub>уп</sub>
Песок крупный гранитный (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	0,997	C <sub>вд</sub> = 57,1 %			Π <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 40,4 кг/МПа				
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—	Расплав конуса Хегерманна 32 см, расплав K <sub>М</sub> 46,5 см							V <sub>вдт</sub> = 812	
ΣV <sub>сух.</sub>	—	759,9				C <sub>вдт</sub> = 82,7%			C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 77,4 %		
Вода	221,1	221,1	V <sub>б.с.</sub>								
M <sub>б.с.</sub>	2398,1	—				V <sub>б.с.</sub>			981		
V <sub>б.с.</sub>	—	981									
ПАПБ-14**											
Портландцемент Красноярский 500 Д0 СЕМ 42,5	700	225,8	0,328	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =66	R <sub>сж</sub> =108	R <sub>сж</sub> =126	
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2410							$\frac{\sum \Pi}{\Pi} = 2,1$
Гранит молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	107,9	0,104	ρ <sub>теор</sub>	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,26 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,85			Π <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> =5,55 кг/МПа;			
Песок тонкий гранитный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		2431							K <sub>уп</sub>
Песок крупный гранитный (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	0,991	C <sub>вд</sub> = 57,5 %			Π <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 37,6 кг/МПа				
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—	Расплав конуса Хегерманна 31,4 см расплав K <sub>М</sub> 46 см							V <sub>вдт</sub> = 820,9	
ΣV <sub>сух.</sub>	—	759,9				C <sub>вдт</sub> = 82,9%			C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 76,7 %		
Вода	230	230	V <sub>б.с.</sub>								
M <sub>б.с.</sub>	2407	—				V <sub>б.с.</sub>			989,9		
V <sub>б.с.</sub>	—	989,9									

Продолжение таблицы 5.1

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>М</sub> Ц	Π <sub>Т</sub> Ц	Π <sub>З</sub> Ц	Прочность МПа, через, сут.		
								1	7	28
ПАПБ-5										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,285	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =66	R <sub>сж</sub> =113	R <sub>сж</sub> =127
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2496						
Мрамор молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /Г	300	103,4	0,091	ρ <sub>теор</sub> 2534	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>ВД</sup> = 2,21 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>ВДТ</sup> = 4,79			Π <sub>Р<sub>с</sub></sub> <sup>УД</sup> = 5,5 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>УД</sup> = 0,18 МПа/кг Π <sub>Р<sub>и</sub></sub> <sup>УД</sup> = 36,6 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,65		
Песок тонкий мраморный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		K <sub>уп</sub>						
Песок крупный мраморный (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	162	0,985							
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—	Распływ конуса Хегерманна 36 см, распływ K <sub>М</sub> 52,5 см							
ΣV <sub>сух.</sub>	—	738								
Вода	200	200								
M <sub>б.с.</sub>	2377	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	938								
ПАПБ-9										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,266	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =78	R <sub>сж</sub> =116	R <sub>сж</sub> =130
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2392						
Известняк молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3400 см <sup>2</sup> /Г	300	111,1	0,085	ρ <sub>теор</sub> 2456	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>ВД</sup> = 2,04 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>ВДТ</sup> = 4,52			Π <sub>Р<sub>с</sub></sub> <sup>УД</sup> = 5,38 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>УД</sup> = 0,18 МПа/кг Π <sub>Р<sub>и</sub></sub> <sup>УД</sup> = 37,8 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 7,02		
Песок тонкий известняк. (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		K <sub>уп</sub>						
Песок крупный известняк. (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	174	0,974							
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—	Распływ конуса Хегерманна 30 см, распływ K <sub>М</sub> 43 см							
ΣV <sub>сух.</sub>	—	775,5								
Вода	186,6	186,6								
M <sub>б.с.</sub>	2363,6	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	962,1								

\* – состав на граните Павловском (D=1200)

\*\* – состав на граните Житомирском (D=1400)

Для сравнения и анализа возможностей использования отходов камнедробления было изготовлено четыре состава на наиболее распространенных горных породах. Методика их изготовления и предварительный выбор каменных пород представлены в главе 3. Исходя из этого, в качестве тонкодисперсного компонента мы использовали гранитную, мраморную и известняковую муку. Удельная поверхность всех выбранных тонкомолотых горных пород мало отличалась от удельной поверхности цемента и равнялась 3400-3800 см<sup>2</sup>/г.

Приготовление бетонных смесей осуществлялось поэтапно. На первом этапе на основе однородно перемешанного с каменной мукой цемента в высокоскоростном смесителе приготавливалась водно-дисперсная суспензия, пластифицированная ГП Melflux 5581F с дозировкой 1 % от массы цемента. Далее в полученную водно-дисперсную систему добавлялся тонкий песок фр.0,16-0,63 мм, который однородно перемешивался, после чего вводили песок-заполнитель фр.0,63-2,5 мм. В/Ц подбиралось с учетом получения степени растекания бетонной смеси, соответствующей распылу конуса Хегерманна 30-34 см.

При проведении эксперимента выбор сочетания цемента, каменной муки и песка-заполнителя был обусловлен возможностью придания бетону определенной степени белизны. Поэтому серые цементы использовались в бетонах с гранитной каменной мукой и гранитными песками. Белый цемент Египетский СЕМ 52,5 использовался со светлыми горными породами – известняком и мрамором.

Из анализа данных табл. 5.1 видно, что бетонные смеси, полученные с использованием гранитной каменной муки и гранитных песков двух месторождений, имеют различные показатели нормированных пределов прочности при сжатии через 28 суток твердения: ПАПБ-1 – 108 МПа и ПАПБ-14 – 126 МПа. При этом показатели условных реологических матриц и относительная степень растекания двух составов одинакова и соответствует распылу конуса Хегерманна 31-32 см. Стоит отметить, что в этих составах

применяли цемент разных производителей и гранитные отходы двух месторождений. В составе ПАПБ-1 использовался Павловский гранит (Д=1200), а в составе ПАПБ-14 – более прочный гранит г. Житомир (Д=1400). Отсюда и незначительные расхождения в прочностных показателях.

В главе 3 было показано, что реотехнологические показатели в водно-дисперсных системах «цемент Египетский – мраморная мука» и особенно в системе «цемент Египетский – известняковая мука» имели максимальные значения. Поэтому неудивительно, что в порошковых бетонных смесях при одинаковых значениях расплыва конуса Хегерманна показатели В/Ц в составах ПАПБ-5 и ПАПБ-9 существенно ниже, чем в составах на граните, и равны 0,285 и 0,266 соответственно. Показатели прочности на таких рекордно низких В/Ц были максимальными и составили 127 МПа и 130 МПа для составов на мраморе и известняке соответственно. Объемная концентрация водно-дисперсной суспензии во всех четырех составах колебалась в близком диапазоне  $C_{вд} = 54,9\%-57,5\%$ , а объемная концентрация водно-дисперсно-тонкозернистых суспензий – в пределах  $C_{вдт} = 81,9\%-82,9\%$ . Объем песка-заполнителя в этих бетонных смесях составляет всего 17-18%. Такие концентрации песка фр. 0,63-2,5 не препятствуют гравитационному растеканию смесей, пластифицированных ГП Melflux 5581F, по сравнению с порошковыми бетонными смесями, благодаря чему получают самоуплотняющиеся смеси с высокой прочностью более 100 МПа. Одновременно снижается доля тонкого песка, необходимого для помола и получения каменной муки.

В целом можно отметить, что предложенная матрица порошково-активированных песчаных бетонов позволяет получать экономичные высокопрочные бетоны на отходах камнедробления различных горных пород. Результаты проведенных экспериментов показывают огромный потенциал применения отсеков камнедробления для изготовления трех основных компонентов для порошково-активированных песчаных бетонов, а

полученные свойства бетонных смесей доказывают целесообразность использования их в качестве архитектурно-декоративных.

В последнее время появились нанометрические гидросиликаты кальция, предназначенные для повышения темпов набора прочности в ранние сроки твердения бетона. Ранее в своих исследованиях [170] мы рассмотрели эффект от введения в состав порошково-активированного бетона гидросиликатов кальция. Для разработанных архитектурно-декоративных бетонов характерен быстрый набор прочности в нормальных условиях твердения без дополнительного введения специальных добавок. На рис. 5.2 представлена кинетика нарастания прочности порошково-активированных песчаных бетонов нового поколения на различных цементах и горных породах. Из анализа рисунка следует, что 85-90 % нормированной прочности достигается за первые 7 суток нормального твердения. В первые сутки твердения достигается 50-60 % нормированной прочности, что составляет 53-78 МПа. Поэтому нет необходимости дополнительно вводить в состав разработанных архитектурно-декоративных бетонов нанометрические гидросиликаты кальция. И без этого обеспечивается ранний набор прочности, что является важным фактором для архитектурно-декоративных бетонов. Такая кинетика набора прочности позволяет увеличивать оборачиваемость форм благодаря ранней распалубке и исключению расходов на тепловлажностную обработку.

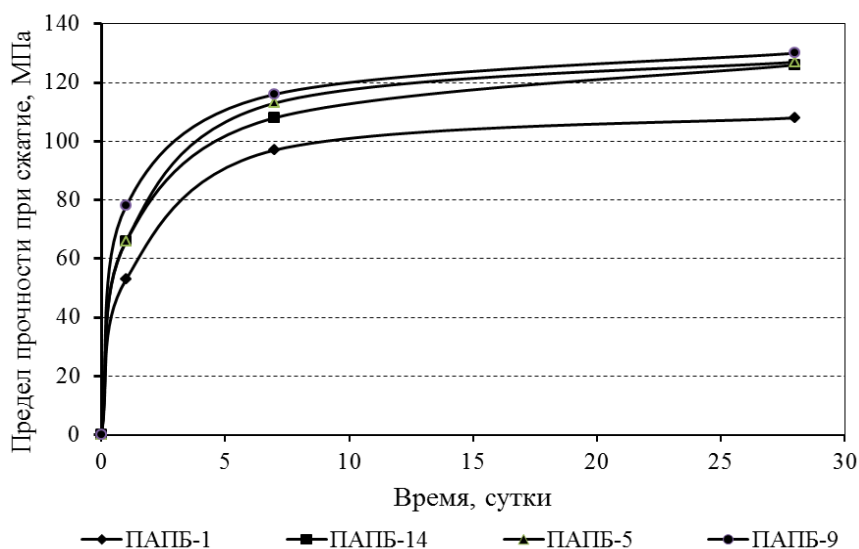


Рис. 5.2 Кинетика набора прочности порошково-активированных бетонов с различными цементами и горными породами

Соотношение прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе находится в диапазоне 5,5-7, что соответствует адекватным значениям бетонов старого поколения.

Мы не определяли модуль упругости бетонов и коэффициент Пуассона в связи с тем, что порошково-активированные песчаные и щебеночные архитектурно-декоративные бетоны не выполняют несущих конструкционных функций. Конструкционные бетоны с адекватной высокой прочностью и плотностью, но с использованием наполнителей и заполнителей из кварцевого песка, уже были исследованы в ряде диссертационных и научных работ на кафедре ТСМиД, с определением деформативных характеристик.

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.

С учетом того, что мы разрабатывали порошково-активированные песчаные бетоны в качестве архитектурно-декоративных, для нас было наиболее важным изучение влияния окрашивающих компонентов, в частности диоксида титана в различных дозировках на прочностные и реотехнологические показатели разработанных бетонных смесей. Изучению данного вопроса посвящен следующий раздел.

## **5.2 Изучение влияния окрашивающих компонентов на прочностные показатели цветных порошково-активированных песчаных бетонов**

Архитектурно-декоративные бетоны нового поколения предполагают возможность придания абсолютно любой формы и цвета изделию. Последнее достигается путем введения в состав бетонных смесей различных окрашивающих компонентов, которые должны быть устойчивы к агрессивной среде, создаваемой сильнощелочным вяжущим – цементом, а также быть свето- и атмосферостойкими. В этом разделе мы описали влияние окрашивающих тонкодисперсных компонентов на реотехнологические и физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов.

### **5.2.1 Изучение действия нанометрического диоксида титана на иницирование прочности бетонов с различными горными породами**

В последние десятилетия перед учеными всего мира все чаще встает вопрос разложения оксида азота  $\text{NO}_x$  в результате использования фотокаталитически активных бетонных поверхностей. Это свойство относится к широко развиваемым за рубежом «зеленым технологиям». В свою очередь, для архитектурно-декоративных бетонов, особенно на основе белого цемента, важнейшей характеристикой диоксида титана является его разбеливающая способность сохранять декоративные свойства и первоначальное визуальное эстетическое восприятие при длительной эксплуатации их в условиях окружающей среды. Практический опыт применения технологии получения «самоочищающихся» бетонных поверхностей впервые был использован в 1996 г. в проекте строительства церкви «Dives in Misericordia» в г. Рим (Италия). Позже технологии получения самоочищающихся фотокаталитических бетонов были применены в других проектах европейской архитектуры, в том числе во Франции, Германии и Бельгии [171]. С 2009 по 2012 гг. компанией Duckerhoff осуществлялся проект ВМВФ «HelioClean». Задачей проекта было изучение каталитического распада загрязняющих атмосферу веществ под действием катализатора и солнечного света и оценка практического применения



технологий для разложения оксидов азота  $\text{NO}_x$  на поверхности стройматериалов. Согласно исследованиям такого эффекта можно достичь путем модификации цементной матрицы введением в нее фотокатализаторов  $\text{TiO}_2$  или путем модификации только бетонной поверхности, например, нанесением специальных составов с  $\text{TiO}_2$  [17].

По результатам обзора отечественной и зарубежной литературы нами не было выявлено работ по теме влияния  $\text{TiO}_2$  на свойства бетонных смесей порошковых и порошково-активированных бетонов нового поколения. При этом стоит отметить достаточное количество публикаций, посвященных применению  $\text{TiO}_2$  в качестве окрашивающего и экологического компонента для цементосодержащих бетонов и строительных растворов [17, 18, 172, 177, 178, 179]. Исчерпывающий обзор о позитивной роли  $\text{TiO}_2$  дан в работе профессоров В.Р. Фаликмана и А.Я. Вейнера [172], в которой систематизированы результаты зарубежных исследований в области применения фотокаталитических бетонов, содержащих наноразмерные частицы  $\text{TiO}_2$ . Основываясь на исследованиях [173, 174, 175, 176], автор подробно представляет механизм и принципы фотокаталитической реакции при окислении широкого ряда органических веществ, а также многих вредных неорганических соединений, в том числе оксидов мышьяка и азота. Показано, что для фотокатализа при введении  $\text{TiO}_2$  наиболее эффективной средой являются цементосодержащие материалы, что обеспечивает широкое применение технологии в различных областях строительства. Это объясняется тем, что ионы  $\text{Ca}^{2+}$  связывают продукты распада, образующиеся при фоторазложении  $\text{NO}_x$  на поверхности с  $\text{TiO}_2$  [172].

Результаты исследований, представленные в [171], показали, что механические свойства фотокаталитических бетонов, в первую очередь прочность, при введении в их состав нанометрических частиц  $\text{TiO}_2$  уменьшаются линейно с увеличением дозировки диоксида титана. Исследования проводились в цементных растворах, содержащих частицы диоксида титана нижнего и среднего наноразмерного уровня с размерами

частиц от 7 до 21 нм. Дозировки  $\text{TiO}_2$  составляли от 5% до 15% от массы цемента, при этом В/Ц было равным 0,39. Вероятно, что понижение механических показателей связано с чрезвычайно малыми размерами нанометрических частиц диоксида титана (7-21 нм), введение которых, особенно в количестве более 5% от массы цемента, снижает реотехнологические свойства системы, образуя менее плотную структуру за счет вовлечения большого количества воздуха. Ранее в своих исследованиях (глава 3) нами не было выявлено негативного действия  $\text{TiO}_2$  на реотехнологические свойства индивидуальных цементных и минеральных суспензий, а также их композиций. Стоит отметить, что нами исследовался диоксид титана китайского производства со средним размером частиц 570 нм, т.е. область размера частиц  $\text{TiO}_2$  относилась к верхнему нанометрическому уровню (100-1000 нм). Поэтому, учитывая уникальные экологические и эстетические свойства  $\text{TiO}_2$  и основываясь на результатах зарубежных исследований [171], очень важно было изучить влияние диоксида титана применительно к разработанным самоуплотняющимся порошково-активированным песчаным бетонам нового поколения с В/Ц не более 0,27-0,33.

В исследованиях д.т.н. профессора В.И. Калашникова [97] приводятся показатели высокой степени водоредуцирования пластифицированной цементно-водной суспензии при добавлении  $\text{TiO}_2$ . Руководствуясь этими результатами, на первоначальном этапе нами было исследовано влияние диоксида титана на реотехнологические показатели тонкодисперсной матрицы (глава 3. п 3.2.3). Согласно полученным результатам введение диоксида титана в незначительном количестве в тонкодисперсную матрицу несущественно повышает ее подвижность. Поэтому было актуальным проведение ряда экспериментов по выявлению действия  $\text{TiO}_2$  в различных дозировках на реотехнологические и физико-технические свойства порошково-активированных архитектурно-декоративных бетонов.

Для оценки влияния диоксида титана на свойства архитектурно-декоративных бетонов было изготовлено шесть абсолютно одинаковых составов с различным содержанием  $TiO_2$  – от 1% до 15% от массы цемента (табл. 5.2, более информативная таблица для контрольного состава представлена в п. 5.1 – ПАПБ-14). В качестве сырьевых компонентов были использованы: цемент Красноярский ПЦ 500 Д0, ГП Melflux 5581F – 1,0% от массы цемента, гранитные отсеvy камнедробления (г. Житомир), предварительно разделенные по фракциям 0,16-0,63 мм и 0,63-2,5 мм и гранитная каменная мука ( $S_{уд} = 3700 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

Перемешивание компонентов бетонной смеси осуществлялось высокоскоростным смесителем при скорости вращения 300-600 об/мин. Бетонная смесь представленных составов готовилась в одно время, выдержка бетонов и их испытания проводились в одинаковых условиях.

Реотехнологические свойства бетонной смеси оценивались по расплыву малого конуса (высота – 22,1 см, диаметр верхний – 10 см, диаметр нижний – 20 см). Характерно, что при увеличении дозировки диоксида титана подвижность бетонной смеси несколько увеличивается. Значение расплыва бетонной смеси из малого конуса меняется от 46 см до 51 см при увеличении дозировки  $TiO_2$  от 1% до 15% (рис 5.3).

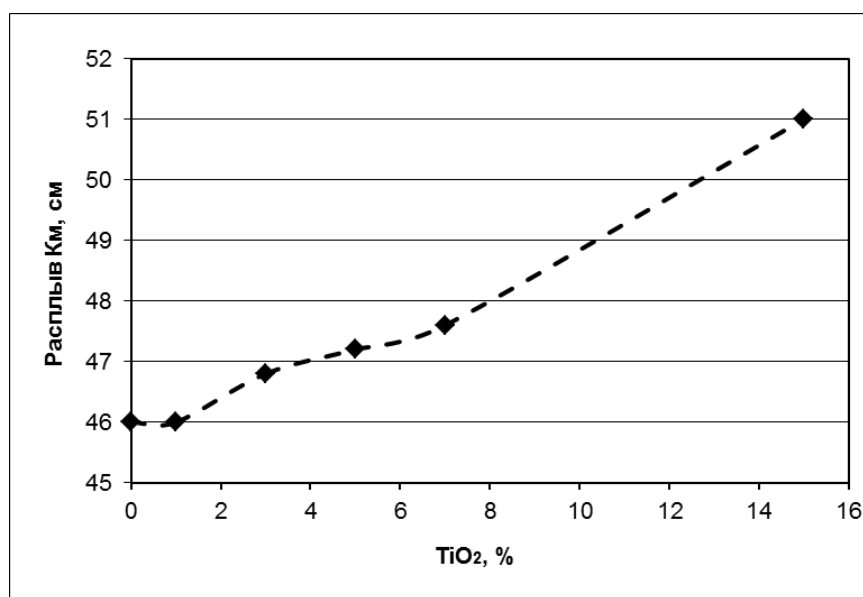


Рис. 5.3 Зависимость подвижности порошково-активированной бетонной смеси от дозировки диоксида титана

Таблица 5.2

Физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов на гранитном песке-заполнителе с различным содержанием  $TiO_2$

Наименование		На 1 м <sup>3</sup> , кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{P_m}{C}$	$\frac{P_r}{C}$	$\frac{P_3}{C}$	$\sum \frac{P}{C}$	Прочность МПа, $R_{из}/R_{сж}$ через, сут.		
								1	7	28
ПАШБ-14	Портландцемент Красноярский 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), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,105		$C_{Rc}^{уд} = 5,55$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,18$ МПа/кг; $C_{Rи}^{уд} = 37,6$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,77$ ;			
	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								
	ГП Melfux 5581F	7	$I_{ПТ}^{вд} = 2,26$							
	$\Sigma M_{сух.}$	2177	$I_{ПЗ}^{вдг} = 4,85$							
Вода	230	$K_{упл.} = 0,99$ $C_{тв}^v = 76,7$ %								
ПАШБ-15	Портландцемент Красноярский 500 Д0	700	2423	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{8,5}{63}$	$\frac{10,8}{107}$	$\frac{18,3}{127}$
	Гранит молотый (ПМ), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,105		$C_{Rc}^{уд} = 5,6$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,18$ МПа/кг; $C_{Rи}^{уд} = 37,6$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,83$ ;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 460×461 мм							
	Песок крупный гранитный (ПЗ), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	TiO <sub>2</sub> , 1% от Ц	7	$I_{ПТ}^{вд} = 2,26$							
	ГП Melfux 5581F	7	$I_{ПЗ}^{вдг} = 4,86$							
$\Sigma M_{сух.}$	2184	$K_{упл.} = 0,99$ $C_{тв}^v = 76,8$ %								
Вода	230									
ПАШБ-16	Портландцемент Красноярский 500 Д0	700	2430	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{8,7}{68}$	$\frac{10,5}{112}$	$\frac{19,1}{132}$
	Гранит молотый (ПМ), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /Г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,104		$C_{Rc}^{уд} = 5,30$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,19$ МПа/кг; $C_{Rи}^{уд} = 36,6$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,91$ ;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 468×470 мм							
	Песок крупный гранитный (ПЗ), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	TiO <sub>2</sub> , 3% от Ц	21	$I_{ПТ}^{вд} = 2,28$							
	ГП Melfux 5581F	7	$I_{ПЗ}^{вдг} = 4,88$							
$\Sigma M_{сух.}$	2198	$K_{упл.} = 0,99$ $C_{тв}^v = 76,9$ %								
Вода	230									

Продолжение таблицы 5.2

ПАПБ-17	Портландцемент Красноярский 500 Д0	700	2432	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{8,9}{68}$	$\frac{10,3}{110}$	$\frac{20,1}{136}$
	Гранит молотый (ПМ), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,104		$\sigma_{Rc}^{уд} = 5,14$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,19$ МПа/кг; $\sigma_{Rи}^{уд} = 34,8$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,76$ ;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 471×472 мм $I_{Пт}^{вд} = 2,29$ $I_{Пз}^{вдт} = 4,90$ $K_{упл.} = 0,99$ $C_{тв}^v = 76,9$ %							
	Песок крупный гранитный (ПЗ), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	TiO <sub>2</sub> , 7% от Ц	35								
	ГП Melfux 5581F	7								
	ΣМсух.	2212								
Вода	230									
ПАПБ-18	Портландцемент Красноярский 500 Д0	700	2438	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{9}{56}$	$\frac{10,8}{109}$	$\frac{18,9}{132}$
	Гранит молотый (ПМ), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,103		$\sigma_{Rc}^{уд} = 5,30$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,19$ МПа/кг; $\sigma_{Rи}^{уд} = 37,0$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,98$ ;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 475×476 мм $I_{Пт}^{вд} = 2,30$ $I_{Пз}^{вдт} = 4,92$ $K_{упл.} = 0,99$ $C_{тв}^v = 77,0$ %							
	Песок крупный гранитный (ПЗ), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	TiO <sub>2</sub> , 7% от Ц	35								
	ГП Melfux 5581F	7								
	ΣМсух.	2226								
Вода	230									
ПАПБ-19	Портландцемент Красноярский 500 Д0	700	2442	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{8,7}{49}$	$\frac{10,5}{92}$	$\frac{17,8}{124}$
	Гранит молотый (ПМ), Суд = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,328		В/Т=0,100		$\sigma_{Rc}^{уд} = 5,64$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,17$ МПа/кг; $\sigma_{Rи}^{уд} = 39,3$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,96$ ;			
	Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	Расплав Км 510×512 мм $I_{Пт}^{вд} = 2,36$ $I_{Пз}^{вдт} = 5,00$ $K_{упл.} = 0,98$ $C_{тв}^v = 77,3$ %							
	Песок крупный гранитный (ПЗ), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	TiO <sub>2</sub> , 15% от Ц	21								
	ГП Melfux 5581F	105								
	ΣМсух.	2282								
Вода	230									

Таким образом, с позиции реологии оправдано введение диоксида титана в состав порошково-активированного песчаного бетона. Его действие можно объяснить тем, что TiO<sub>2</sub> имеет высокую дисперсность и обладает избирательной поверхностью для адсорбции молекул ГП.

Анализируя табл. 5.2, можно отметить, что в целом высокие показатели нормированных пределов прочности на сжатие в зависимости от дозировки

TiO<sub>2</sub> колеблются в диапазоне 124-136 МПа (рис. 5.4). Максимальное значение прочности (136 МПа) отмечено при содержании диоксида титана, равном 5% от массы цемента. При повышении дозировки TiO<sub>2</sub> до 15% прочность на сжатие падает на 12 МПа. В связи с этим можно утверждать, что введение в состав бетона TiO<sub>2</sub> в количестве 5% от массы цемента обосновано не только с позиции экологичности и придания определенной окраски архитектурно-декоративному бетону, но и с позиции реологии и улучшения физико-технических показателей, в частности прочностных.

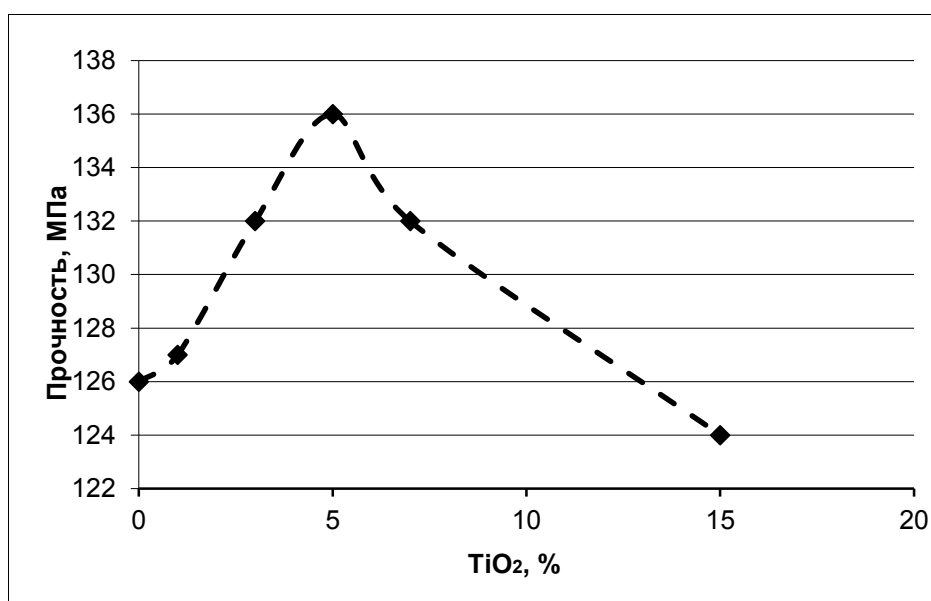


Рис. 5.4 Зависимость прочности порошково-активированного бетона от дозировки диоксида титана через 28 суток твердения

Адекватные результаты по физико-техническим и реотехнологическим характеристикам были получены также на составах с использованием белого цемента и каменных отходов известняка и мрамора (приложение 1, табл.2 – табл.3).

По нашему мнению, повышение прочности при введении незначительного количества диоксида титана обусловлено не столько его реакционной способностью связывать в короткие сроки твердения гидролизную известь, выделяемую алитом и белитом, сколько реологической активностью TiO<sub>2</sub>, имеющего высокую степень дисперсности и выступающего в системе как топологически-структурирующий и реологически-активный компонент.

Таким образом, в дальнейших исследованиях было необходимо осуществить ряд экспериментов, доказывающих либо опровергающих реакционную способность диоксида титана по отношению к гидролизной извести. В связи с этим мы изучили возможность протекания реакции диоксида титана с известью, предположительно с образованием гидротитоната кальция при нормальной температуре 20°C и при синтезе в условиях автоклавной обработки в среде насыщенного пара при давлении его 1,2 МПа и температуре 191°C. Для этого путем полусухого прессования были заформованы образцы цилиндрической формы с диаметром основания 25,1 мм и высотой 24 мм из смеси состава по массе:  $\text{TiO}_2$  – 66%,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – 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 течение 24 суток 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.

После прессования была испытана формовочная прочность образцов при сжатии сырой прессовки, которая равнялась 4,5 МПа. Образцы, твердевшие в течение 24 суток над водой при температуре 20°C, показали прочность, равную 8,2 МПа, а после 4 месяцев твердения от момента изготовления – 18,7 МПа. По нашему мнению, столь незначительное повышение прочности от 1 суток до 24 произошло за счет отвердевания цемента по сквозьрастворному механизму. Дальнейшее повышение прочности за 4 месяца твердения произошло за счет образования новой фазы. Образцы, прошедшие автоклавный процесс, увеличили прочностные показатели с 4,5 МПа до 21,7 МПа, а за последующие 4 месяца нормального

твердения – до 26,2 МПа. Такой существенный набор прочности после гидротермального синтеза можно объяснить появлением нового соединения, которое не может быть ничем иным, как гидротитанатом кальция. Одновременно после разрушения образцов путем измельчения материала и добавления его в суспензию с водой определялась рН среды. В результате было установлено, что рН среды образцов, испытанных сразу после прессования, и образцов, твердевших в нормальных условиях, находилась в диапазоне 12,1, а водная вытяжка измельченной суспензии образцов, прошедших гидротермальный синтез имела рН среды 7,5. Это косвенным образом доказывает протекание термодинамической реакции диоксида титана с известью с образованием гидротитоната кальция.

В подтверждение образования новой фазы и изменения содержания извести был проведен рентгеноструктурный анализ на автоматизированном дифрактометре «Empyrean» компании PANalytical (Нидерланды). Рентгенограммы представлены на рис. 5.5-5.7.

На рис. 5.5 представлена рентгенограмма диоксида титана. Как видим все межплоскостные расстояния проявились четко, от аналитических до слабых рефлексов. На рентгенограмме состава «TiO<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub>-ПЦ» (рис. 5.6), твердевшего в нормальных условиях в течение суток, появились межплоскостные расстояния свободного гидроксида кальция Ca(OH)<sub>2</sub> (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 является свидетельством того, что после твердения композиционной смеси в течение суток в нормальных условиях свободный TiO<sub>2</sub> сохранился полностью несвязанным. На рентгенограмме автоклавированных образцов (рис. 5.7) 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°. Интенсивные рефлексы в углах 28°, 32°, 53°, 56°, обозначенные символом «Н» (рис. 5.7), свидетельствуют о синтезе новой фазы, повышающей прочность образцов. Таким образом, 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 и длительного твердения реакции диоксида титана с гидролизной известью вполне возможны.

Таким образом, и прочностной анализ, и анализ рентгенограмм свидетельствуют о том, что процесс взаимодействия диоксида титана с известью при нормальных условиях в кратковременный период проведения эксперимента не обнаружен. А в условиях длительного периода твердения или при повышенных температурах он подтверждается различными методами анализа. В связи с этим, наряду с исследованием влияния диоксида титана на нарастание прочности порошково-активированного песчаного бетона в нормированные сроки твердения (28 суток), был изучен прирост прочности в более длительные сроки (290 суток) в тех же условиях твердения. Результаты эксперимента представлены на рис. 5.8.

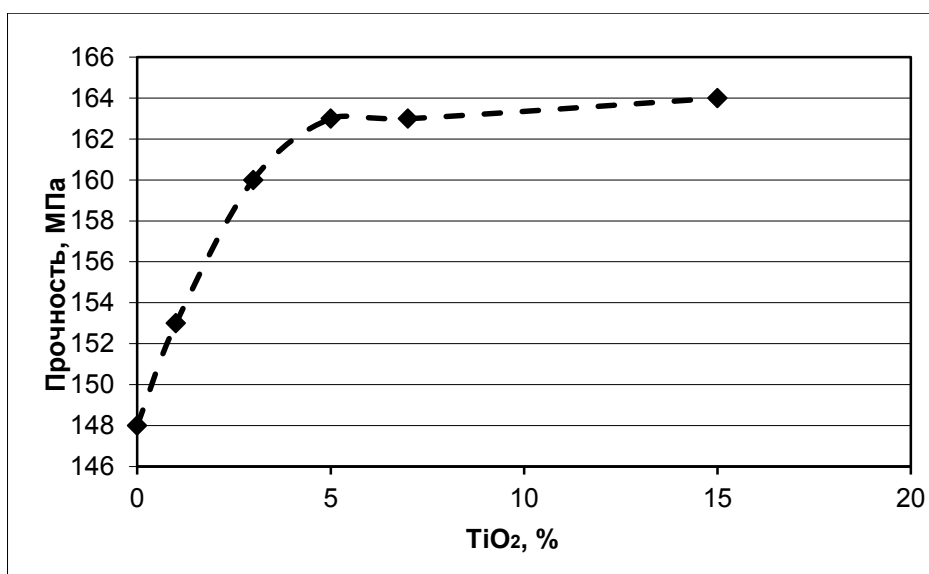
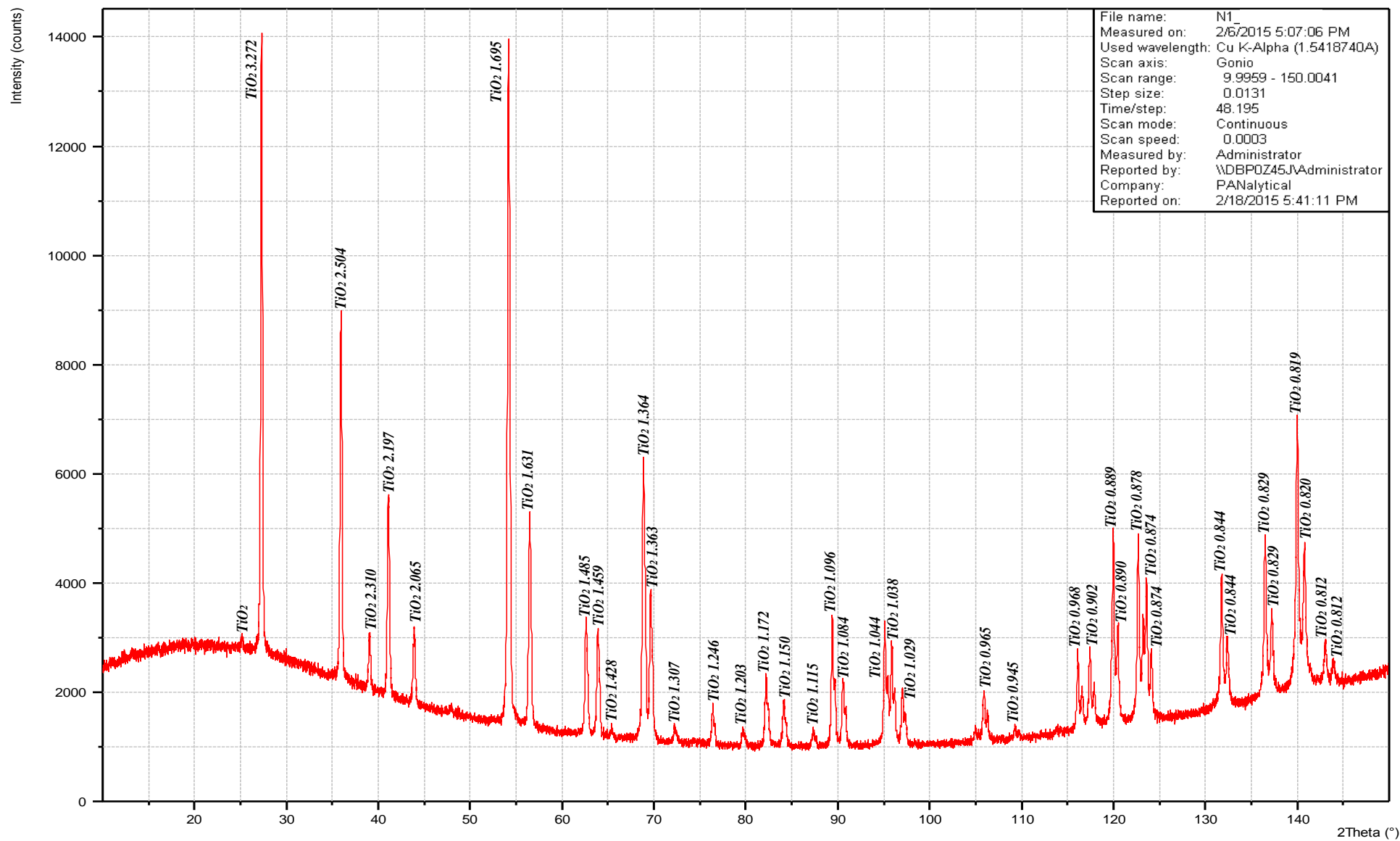


Рис. 5.8 Зависимость прочности порошково-активированного бетона от дозировки диоксида титана на 290-е сутки твердения



File name: N1  
 Measured on: 2/6/2015 5:07:06 PM  
 Used wavelength: Cu K-Alpha (1.5418740Å)  
 Scan axis: Gonio  
 Scan range: 9.9959 - 150.0041  
 Step size: 0.0131  
 Time/step: 48.195  
 Scan mode: Continuous  
 Scan speed: 0.0003  
 Measured by: Administrator  
 Reported by: WDBP0Z45JAdministrator  
 Company: PANalytical  
 Reported on: 2/18/2015 5:41:11 PM

Рис. 5.5 Рентгенограмма TiO<sub>2</sub>

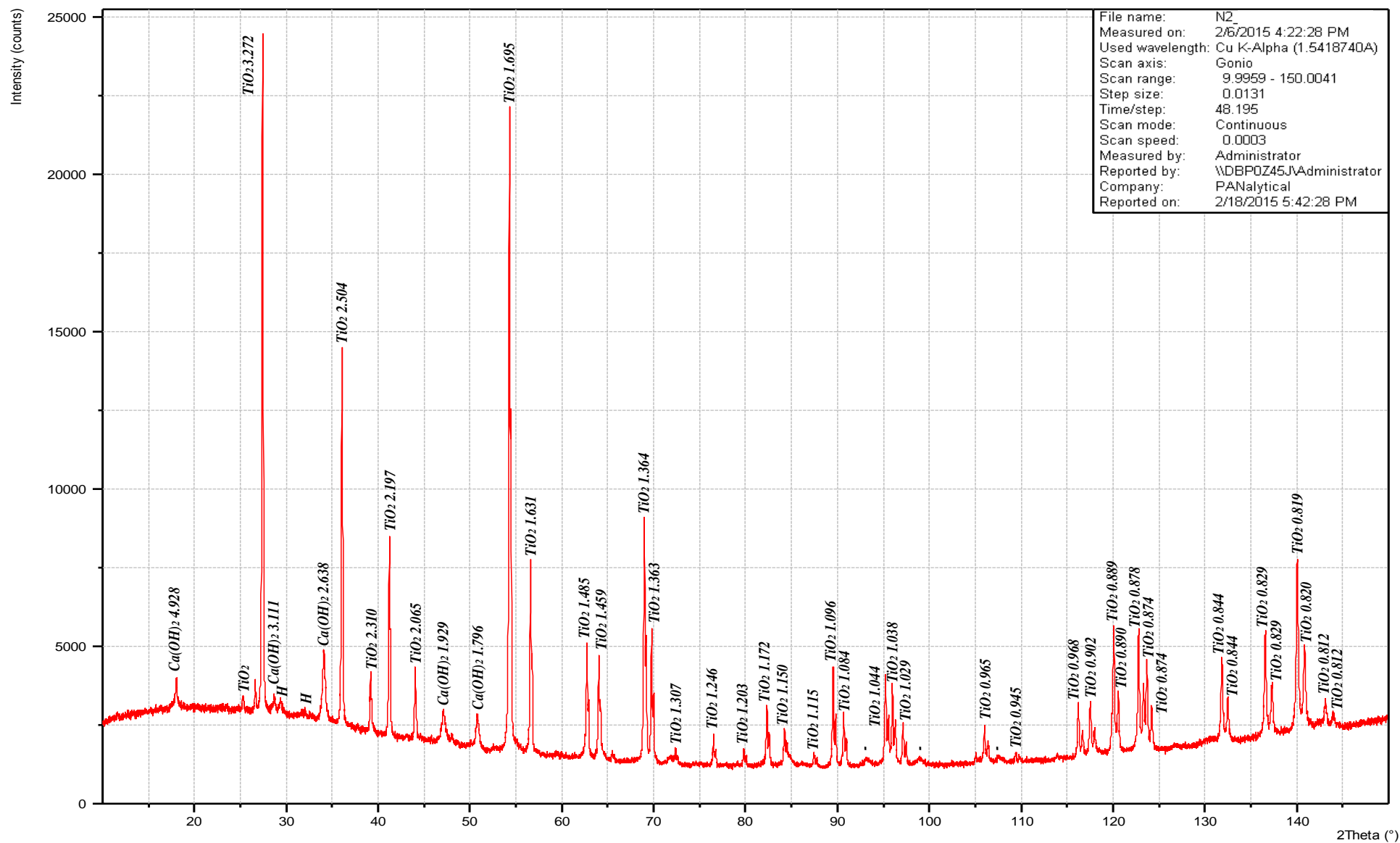


Рис. 5.6 Рентгенограмма композиционного состава «TiO<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub>-ППЦ»

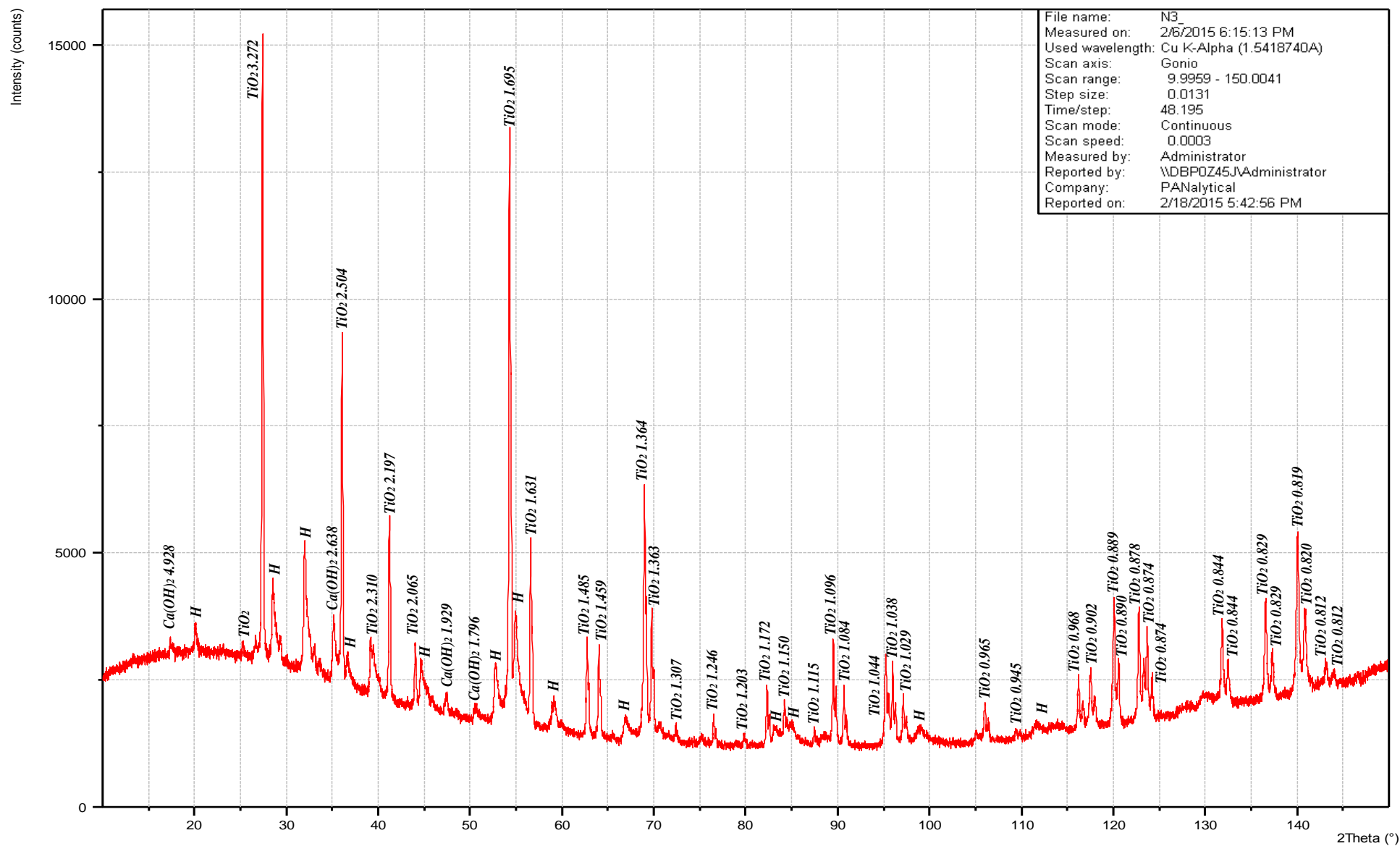


Рис. 5.7 Рентгенограмма композиционного состава «TiO<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub>-ПЦ» после автоклавизации

Из анализа рис. 5.8 видно, что в более длительные сроки твердения, а именно на 290-е сутки, прочность на сжатие контрольного состава (ПАПБ-14) возрастает на 17% относительно той, что была после 28 суток твердения. Стоит отметить, что введение диоксида титана повышает значения прочностных показателей с течением более длительного промежутка времени независимо от дозировки. Максимальная прочность, равная 164 МПа, получена у бетона с 15 %  $\text{TiO}_2$  от массы цемента. Характерно, что в начальные сроки твердения введение такого количества диоксида титана снижало прочность бетона даже относительно контрольного состава (124 МПа после 28 суток твердения). Такой набор прочности в бетонах с  $\text{TiO}_2$  можно объяснить тем, что в порошково-активированных бетонах диоксид титана, возможно, играет роль компонента, вступающего в реакцию с гидролизной известью в течение длительного промежутка времени, что подтверждается набором бетоном прочности, независимо от дозировки  $\text{TiO}_2$ . В связи с этим можно говорить, что в нормально-влажностных условиях такая реакция протекает очень медленно, в отличие от условий при повышенных температурах, что было подтверждено экспериментальным путем, описанным ранее. Можно полагать, что диоксид титана, введенный в значительном количестве, в ранние сроки твердения ведет себя как инертный наполнитель, а со временем, по мере выделения гидролизной извести, связывает ее.

Таким образом, диоксид титана в бетонах нового поколения выступает не только в роли реологически-активного компонента, увеличивающего подвижность бетонной смеси, но и в роли реакционного компонента, взаимодействующего с продуктами гидратации цемента при более длительном твердении. В связи с этим остается открытым вопрос об экологической функции диоксида титана. Если он в бетоне в течение длительного срока эксплуатации переходит в гидротитанат кальция, способен ли последний так же эффективно облагораживать воздух от

выбросов автомобильного транспорта и ряда производств? Эта важная проблема требует дополнительных исследований.

Выше в литературном обзоре нами были представлены ссылки на труды зарубежных исследователей по изучению катализирующей способности диоксида титана на поверхности бетона. К сожалению, в источниках не было сказано, насколько сохраняется катализирующая способность  $TiO_2$  в бетоне, если он вступает в реакцию с гидролизной известью. Отталкиваясь от результатов рентгеноструктурного анализа, описанных ранее, можно сделать вывод, что, вероятнее всего, с образованием соединений с малой основностью достаточное количество  $TiO_2$  остается свободным, и катализирующая способность поверхности бетона при этом существенно не уменьшается. Для уменьшения степени связывания  $TiO_2$  с  $Ca(OH)_2$  можно порекомендовать введение «белой сажи» – высокорреакционной пуццоланической добавки, связывающей портландит. Мы можем предложить несколько вариантов формирования развернутой декоративной катализирующей поверхности бетонов для увеличения площади поверхности массообмена между бетоном и омывающим ее загрязненным воздухом. Этого можно достичь благодаря использованию предложенной декоративной отделки «игра света-тени» за счет выступов на поверхности. В этом случае желательно выступы делать овальной или цилиндрической формы.

Проведенные эксперименты и детальный обзор источников литературы подтверждают позитивное влияние диоксида титана не только на прочностные показатели бетонов нового поколения, но и на другие эксплуатационные характеристики их.

На следующем этапе исследования было необходимо изучить влияние других пигментов и красителей на свойства порошково-активированных бетонов с использованием отходов камнедробления и возможность создания различных цветовых оттенков.

### **5.2.2 Изучение действия органических пигментов и неорганических красителей на свойства порошково-активированных песчаных бетонов**

Ранее в п.3.2.3 было описано влияние различных красителей, в частности оксидных пигментов и фталоцианинового красителя, на реотехнологические показатели пластифицированных водно-дисперсных систем «вода – цемент – каменная мука». Было показано, что введение незначительного количества окрашивающего компонента не блокирует, а в некоторых случаях увеличивает подвижность тонкодисперсной суспензии. Только введение органического фталоцианинового красителя в пластифицированную водно-дисперсную систему несущественно увеличивает В/Т.

Технология приготовления окрашенных бетонов старого и переходного поколений предполагает введение пигментов в бетонную смесь при перемешивании тихоходными смесителями. В результате неоднородности перемешивания пигменты образуют в системе значительное количество концентраторов напряжения различного размерного уровня. Поэтому в бетонах старого и переходного поколений введение пигментов в состав зачастую являлось негативным фактором, понижающим качественные показатели бетонной смеси и бетона [32, 34]. В порошковых и порошково-активированных бетонах нового поколения тонкодисперсная матрица значительно увеличивается за счет добавления реологически-активного компонента – каменной муки. При этом введение пигмента осуществляется на этапе подготовки тонкодисперсной системы, при совместном однородном перемешивании всех дисперсных компонентов. В этом случае пигмент является еще одним компонентом, увеличивающим объем реологической матрицы. После подготовки тонкодисперсной смеси и перемешивании ее в высокоскоростном смесителе получают окрашенную суспензию, в которую добавляют песок-заполнитель. В результате такой процедуры приготовления бетонной смеси все тонкодисперсные компоненты распределяются однородно в структуре бетона.

В некоторых зарубежных литературных источниках говорится о том, что

оптимальное количество оксидных пигментов в архитектурно-декоративных бетонах должно находиться в пределах не более 8-10% от массы цемента. В связи с этим с учетом практической наработки экспериментов, в частности экспериментов с диоксидом титана (п.5.2.1), была выявлена оптимальная дозировка оксидного пигмента для порошково-активированного песчаного бетона, равная 5%. Выбор дозировки органического фталоцианинового (ФЦ) красителя осуществлялся исходя из результатов изучения его действия на реотехнологические свойства пластифицированной водно-дисперсной системы (п.3.2.3). Было показано, что введение в пластифицированную суспензию «цемент – каменная мука» ФЦ красителя блокирует действие ГП, особенно при дозировке более 0,5% от массы цемента. Такое действие негативно влияет на реотехнологические показатели бетонной смеси, что в конечном счете приводит к снижению качественных показателей бетона. Поэтому дозировка ФЦ красителя была выбрана равной 0,5 % от массы цемента.

С целью изучения действия различных пигментов и красителей в бетонах нового поколения были проведены исследования реотехнологических свойств и физико-технических показателей порошково-активированных бетонных смесей с незначительным содержанием окрашивающих компонентов. При проведении исследований использовались неорганические пигменты – оксиды металлов и один органический краситель – фталоцианиновый голубой. В качестве контрольного состава был выбран состав бетона без красителей с известняковым заполнителем ПАПБ-9 (табл.5.1). Выбор состава осуществлялся исходя из двух критериев: качественных показателей бетона и белого цвета бетонной смеси, позволяющей получить максимально насыщенные цвета при окраске. Процедура приготовления окрашенных бетонных смесей мало чем отличалась от процедуры приготовления порошково-активированных бетонных смесей с различными горными породами (п. 5.1), за исключением введения в состав пигментов и органических красителей. В первом случае



сухие оксидные пигменты в течение 10-15 минут предварительно однородно смешивались в мельнице с цементом с целью «посадки» более дисперсных частиц пигментов на более крупные частицы цемента. Полученная комбинация компонентов однородно смешивалась с известняковой мукой, после чего приготавливалась водно-минеральная суспензия. Органический фталоцианиновый краситель вводился в воду затворения, в которую при высокой скорости вращения лопастей добавлялась однородно перемешанная смесь цемента и известняковой муки. Далее в однородную водно-дисперсную суспензию при меньшей скорости вращения смесителя добавлялся тонкий песок 0,16-0,63 мм и песок-заполнитель фр.0,63-2,5 мм.

Стоит отметить высокую плотность разработанных окрашенных порошково-активированных песчаных бетонов, равную  $2400 \text{ кг/м}^3$ , что подтверждается макрофотографией структуры (приложение 1, рис. 1).

В результате проведенных экспериментов было установлено, что оксиды железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в количестве 5 % от массы цемента не снижают реологическую активность ГП Melflux 5581 и повышают нормированный предел прочности при сжатии через 28 суток твердения со 130 МПа (ПАПБ-9) до 138 МПа (ПАПБ-20) и 140 МПа (ПАПБ-21). Вероятнее всего, это связано с тем, что высокодисперсные пигменты выступают в системе как реологически-активные компоненты, незначительно повышают подвижность смесей, а нанометрические частицы стабилизируют микроструктуру цементного камня.

Некоторое замедление начальной прочности у бетона с ФЦ красителем по сравнению с бетонами с пигментами через 1 сутки на 16-20 % и последующее на седьмые сутки на 9-10 % связано, вероятно, с адсорбцией пигмента как поверхностно-активного вещества на частицах цемента и экранирования поверхности их. Через 28 суток также наблюдается уменьшение прочности на 8-9 % по сравнению с окрашенными бетонами (ПАПБ-20, ПАПБ-21), но в сравнении с контрольным составом (ПАПБ-9) она не изменилась. Результаты экспериментов приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов на известняковом песке-заполнителе с различными пигментами

Наименование компонента		На 1 м <sup>3</sup> , кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	$\frac{\Pi_{\text{м}}}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_{\text{т}}}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_{\text{з}}}{\text{Ц}}$	$\frac{\sum \Pi}{\text{Ц}}$	Прочность МПа, R <sub>из</sub> / R <sub>сж</sub> через, сут.		
								1	7	28
ПАПБ-20	Портландцемент белый Египетский СЕМ 52,5	700	2409	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{12,4}{86}$	$\frac{13,9}{120}$	$\frac{19,3}{138}$
	Известняк молотый(Пм), Sуд = 3400 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,271		В/Т=0,085		Ц <sub>Рс</sub> <sup>уд</sup> = 5,07 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,19 МПа/кг; Ц <sub>Ри</sub> <sup>уд</sup> = 36,2 кг/МПа; R <sub>с</sub> /R <sub>и</sub> = 7.15;			
	Песок тонкий известняк. (Пт), фр. 0,16-0,63 мм	700	ОК <sub>ст</sub> = 26,2 см Расплав КХ 315×317 мм И <sub>Пт</sub> <sup>вд</sup> = 2,08 И <sub>Пз</sub> <sup>вдт</sup> = 4,58 К <sub>упл.</sub> = 0,975 C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 80,4%							
	Песок крупный известняковый (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	Пигмент красн.,5% от Ц	35								
	ГП Melfux5581F, 1% от Ц	7								
	ΣМсух. Вода	2212 189,7								
ПАПБ-21	Портландцемент белый Египетский СЕМ 52,5	700	2423	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{12,1}{84}$	$\frac{14,3}{122}$	$\frac{19,6}{140}$
	Известняк молотый (Пм), Sуд = 3400 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,269		В/Т=0,084		Ц <sub>Рс</sub> <sup>уд</sup> = 5,0 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,20 МПа/кг; Ц <sub>Ри</sub> <sup>уд</sup> = 35,7 кг/МПа; R <sub>с</sub> /R <sub>и</sub> = 7,14;			
	Песок тонкий известняк. (Пт), фр. 0,16-0,63 мм	700	ОК <sub>ст</sub> = 25,6 см Расплав КХ 295×296 мм И <sub>Пт</sub> <sup>вд</sup> = 2,08 И <sub>Пз</sub> <sup>вдт</sup> = 4,58 К <sub>упл.</sub> = 0,977 C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 80,8%							
	Песок крупный известняковый (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	Пигмент желтый,5% от Ц	35								
	ГП Melfux5581F, 1% от Ц	7								
	ΣМсух. Вода	2212 188,7								
ПАПБ-22	Портландцемент белый Египетский СЕМ 52,5	700	2398	0,43	1	0,67	2,1	$\frac{10,3}{72}$	$\frac{12,9}{110}$	$\frac{18,3}{127}$
	Известняк молотый(Пм), Sуд = 3400 см <sup>2</sup> /г	300	В/Ц=0,266		В/Т=0,084		Ц <sub>Рс</sub> <sup>уд</sup> = 5,51 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,18 МПа/кг; Ц <sub>Ри</sub> <sup>уд</sup> = 38,2 кг/МПа; R <sub>с</sub> /R <sub>и</sub> = 6,94;			
	Песок тонкий известняк. (Пт), фр. 0,16-0,63 мм	700	ОК <sub>ст</sub> = 27,5 см Расплав КХ 331×329 мм И <sub>Пт</sub> <sup>вд</sup> = 2,08 И <sub>Пз</sub> <sup>вдт</sup> = 4,58 К <sub>упл.</sub> = 0,971 C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 79,9%							
	Песок крупный известняковый (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470								
	Пигмент Ф/Ц, 0,5% от Ц	3,5								
	ГП Melfux5581F, 1% от Ц	7								
	ΣМсух. Вода	2180 195,6								

Кинетика набора прочности окрашенных порошково-активированных бетонов мало чем отличается от кинетики набора прочности контрольного состава (ПАПБ-9) (рис. 5.9). В первые сутки твердения в нормально-влажностных условиях достигается высокая прочность, равная 50-60% нормированной прочности.

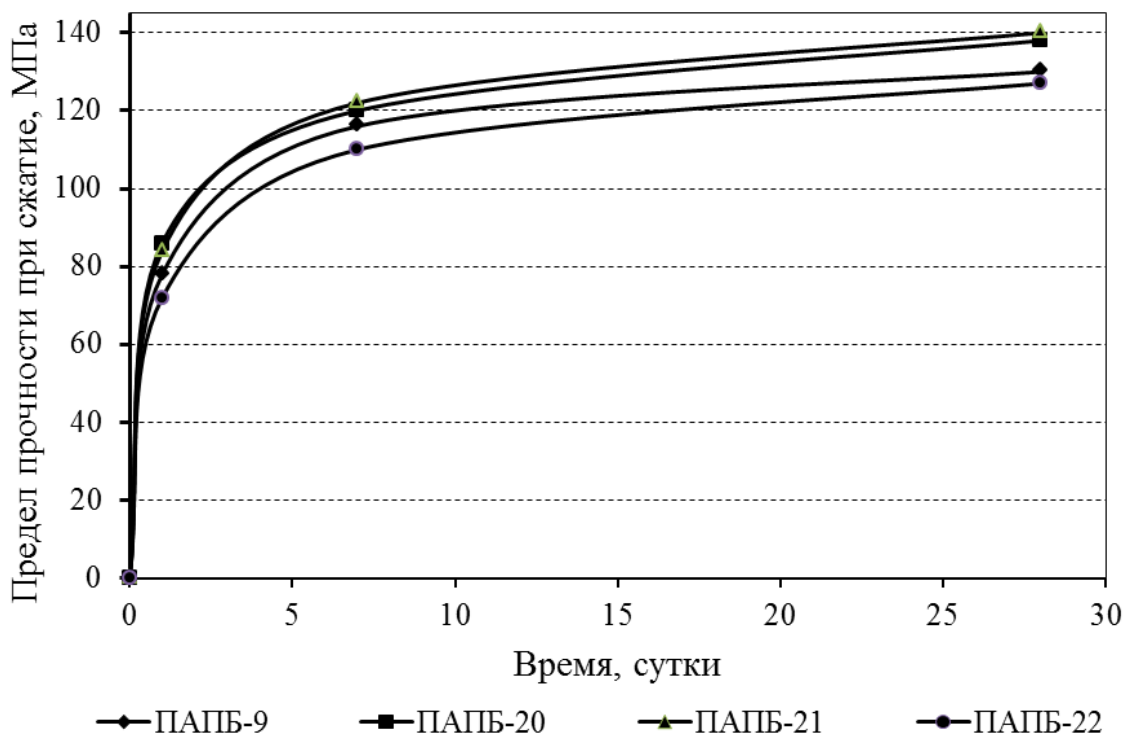


Рис. 5.9 Кинетика набора прочности порошково-активированного бетона с различными пигментами

Таким образом, введение органического красителя в предложенной дозировке не блокирует действие ГП и не снижает прочность по сравнению с контрольным составом. При введении оксидных тонкодисперсных пигментов значения прочностных показателей возрастают.

В литературных источниках и рекламных проспектах порошковых оксидных пигментов говорится о длительном сохранении первоначального цвета и высокой стойкости их к воздействиям замораживания-оттаивания и агрессивных сред. В связи с этим мы специальных исследований по оценке сохранения цветоустойчивости не проводили. Но бетон состава ПАПБ-20 после 1000 циклов замораживания-оттаивания визуально не изменил своего цвета, о чем будет сказано ниже. Чтобы оценить степень цветоустойчивости

ФЦ красителя с течением длительного промежутка времени, мы провели специальный эксперимент. Суть эксперимента заключалась в изготовлении образцов силикатного кирпича с ФЦ красителем, взятым в дозировке 0,5% от массы известково-кремнеземистого вяжущего. Силикатный бетон подвергался гидротермальной обработке при давлении насыщенного водяного пара 1,0 МПа (10 ати) и температуре 186°С. После автоклавизации образцы – цилиндры диаметром  $d=5$  см и высотой  $h=5$  см имели яркий сочный цвет. Образцы хранились на стенде в натуральных условиях в течение одного года, при этом часть поверхности испытываемых образцов была закрыта, а вторая часть подвергалась агрессивным воздействиям окружающей среды. Визуальная оценка образцов после испытания не позволила выявить существенных различий в цвете на поверхности исследуемых образцов (рис. 5.10)

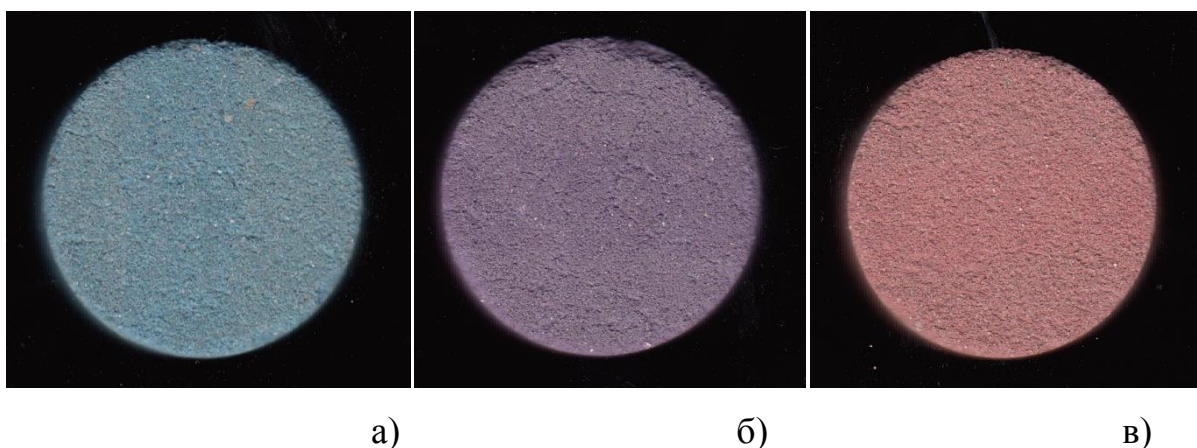


Рис. 5.10 Поверхность образцов, окрашенных различными фталоцианиновыми красителями, подвергнутых натурным испытаниям в течение одного года:

а) фталоцианиновый синий; б) кубовый фиолетовый; в) кубовый бордо

Помимо длительного сохранения первоначального цвета, для архитектурно-декоративных бетонов, эксплуатирующихся в условиях атмосферных воздействий, важным критерием оценки качества являются показатели морозостойкости. Поэтому в следующих разделах мы представим результаты исследований, характеризующие водопоглощение и морозостойкость порошково-активированных песчаных бетонов, в том числе

окрашенных, на основе различных горных пород для рекомендации их в качестве долговечных высокофункциональных архитектурно-декоративных бетонов.

### **5.3 Водопоглощение и капиллярный подсос архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов**

Архитектурно-декоративные бетоны в силу своего предназначения и эксплуатационных условий должны быть очень плотными с высокой степенью морозостойкости и атмосферостойкости и обязательно с низким водопоглощением. Это достигалось оптимальным подбором состава и формированием новой микрометрической топологической структуры компонентов бетона с добавлением в состав большого количества каменной муки, тонкого песка, песка-заполнителя фракции 0,63-2,5 мм, полученных из отсеков камнедробления горных пород. Использование такого набора компонентов позволило получить в бетонной смеси, в совокупности с цементом и суперпластификатором, агрегативно-устойчивые, предельно-разрушенные, высококонцентрированные суспензии, образующие самоуплотняющиеся бетонные смеси.

В данном разделе приведены результаты научных исследований по изучению водонасыщения и капиллярного подсоса архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона.

Для исследований были изготовлены образцы бетона на сером цементе с полным набором компонентов, полученных из отходов дробления гранита, и с различным содержанием черного железистоокисного пигмента (составы ПАПБ-1-4); а также на белом цементе с полным набором компонентов различной дисперсности и зернистости из мрамора и известняка с различным содержанием диоксида титана (составы ПАПБ-5-12). Кроме того, было исследовано влияние добавки фталоцианинового красителя и железистоокисных пигментов на водонасыщение окрашенных бетонов (ПАПБ-20-22). Составы исследуемых бетонов приведены в табл. 5.1-5.3 главы 5 и в приложении 1 (табл. 1 – табл. 3).

Согласно методике определения водопоглощения по ГОСТ 12730.3-78 – «Бетоны. Метод определения водопоглощения» испытания следует проводить на образцах-кубах с размером ребра 100 мм. Ранее в своих исследованиях (глава 4, п. 4.3) мы определили зависимость водопоглощения от масштабного фактора для порошково-активированного песчаного бетона и экспериментальным путем получили коэффициенты пересчета значений водопоглощения с образцов-балочек размерами 40×40×160 мм на образцы-кубы 100×100×100 мм. Поэтому для определения водопоглощения нами были изготовлены образцы-балочки 40×40×160 мм. Это позволило значительно увеличить объем исследований и получить значения водопоглощения для большого количества образцов разного состава. На рис. 5.11-5.13 представлена кинетика водонасыщения порошково-активированного песчаного бетона, исходя из испытаний на образцах-балочках 40×40×160 мм. Реальные показатели значений водопоглощения исследуемых бетонов, согласно ГОСТу, будут существенно ниже, учитывая масштабный фактор и полученные ранее коэффициенты пересчета значений водопоглощения с образцов различных размеров и геометрических форм (табл.5.4).

Таблица 5.4

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	1,73

Кроме исследования водопоглощения в кратковременные сроки (72-96 часов), как того требует ГОСТ, было изучено и длительное водонасыщение бетонов в течение 3 месяцев.

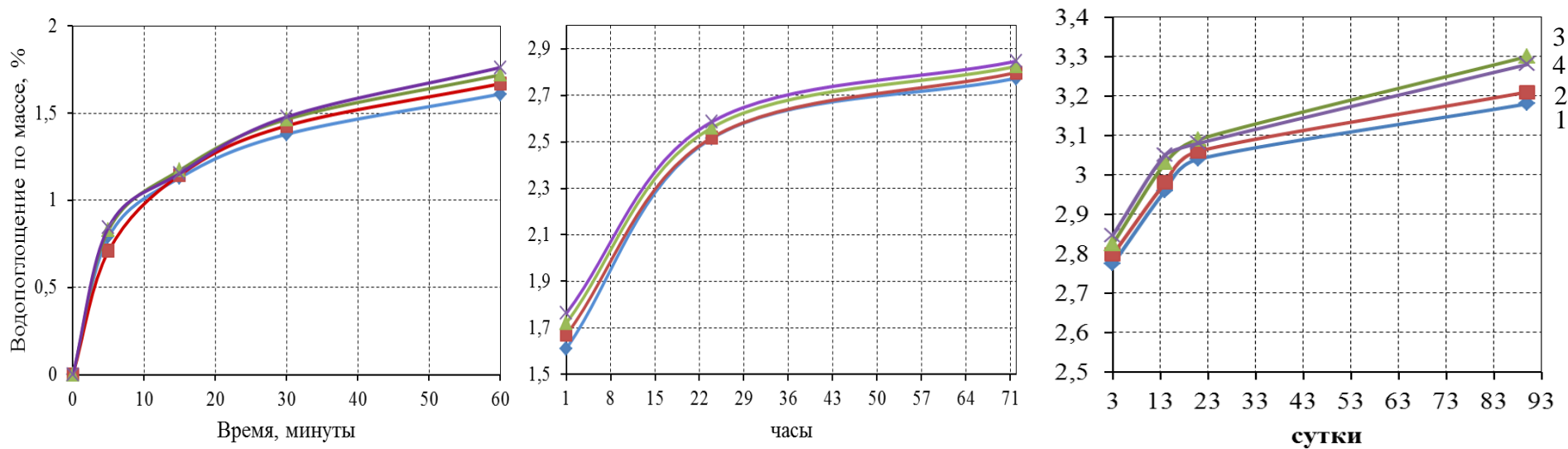


Рис. 5.11 Водопоглощение по массе окрашенного архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона на гранитных компонентах с различным содержанием железистого пигмента (черный):  
 1 – контрольный состав (ПАПБ-1); 2 – с 3% железистого пигмента (ПАПБ-2);  
 3 – с 5% железистого пигмента (ПАПБ-3); 4 – с 7% железистого пигмента (ПАПБ-4)

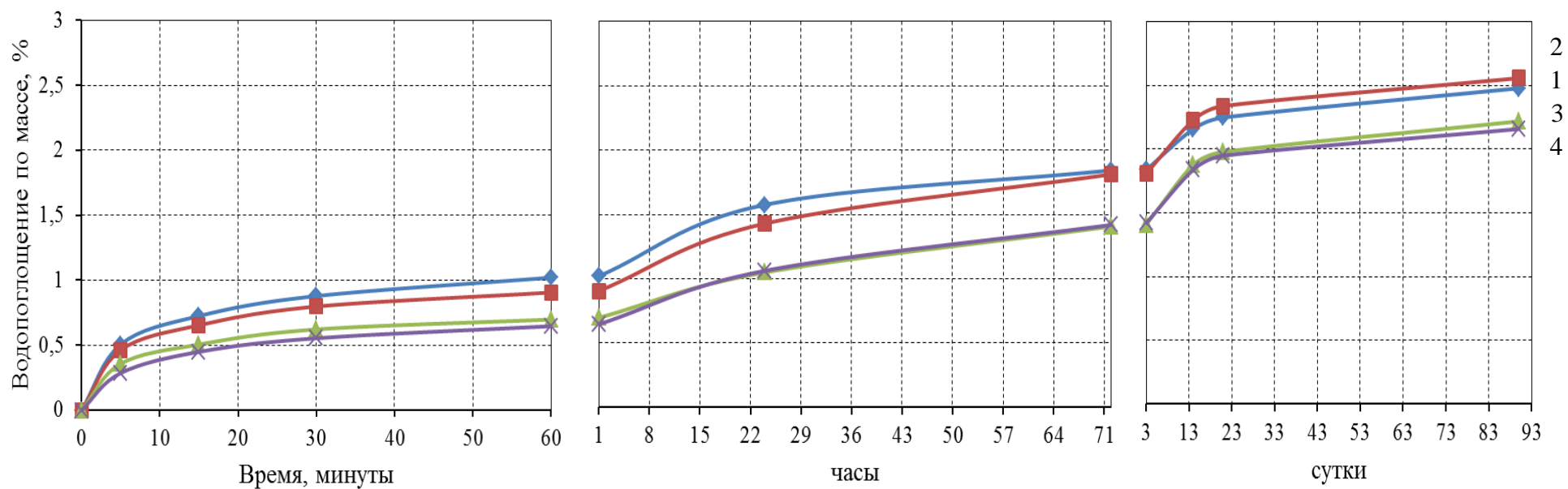


Рис. 5.12 Водопоглощение по массе архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона на белом цементе и компонентах из мрамора с различным содержанием диоксида титана:

- 1 – контрольный состав (ПАПБ-5); 2 – с 3% диоксида титана (ПАПБ-6);
- 3 – с 5% диоксида титана (ПАПБ-7); 4 – с 7% диоксида титана (ПАПБ-8)



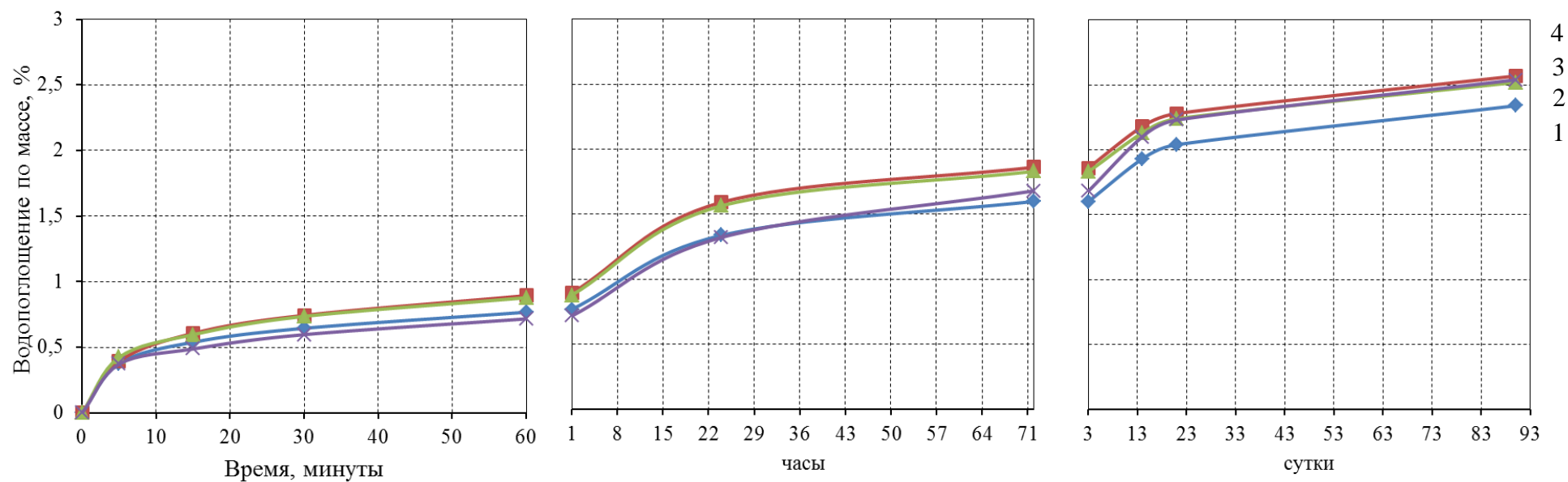


Рис. 5.13 Водопоглощение по массе архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона на белом цементе и компонентах из известняка с различным содержанием диоксида титана:

1 – контрольный состав (ПАПБ-9); 2 – с 3% диоксида титана (ПАПБ-10);  
 3 – с 5% диоксида титана (ПАПБ-11); 4 – с 7% диоксида титана (ПАПБ-12)

Как видно из рис. 5.11, водопоглощение по массе архитектурно-отделочного бетона на компонентах из гранита и Вольском цементе как контрольного состава, так и окрашенного в первые часы водонасыщения не превышает 2%. При более длительном насыщении образцов в воде (в течение 3 месяцев) значения водонасыщения находятся в пределах 3,3%. Следует отметить, что в более длительные сроки нахождения образцов в воде – до 3 месяцев – не отмечено никакого различия в соотношении значений водонасыщения, контрольного состава и составов окрашенных архитектурно-декоративных бетонов при содержании окрашивающего черного пигмента в количествах 3%, 5% и 7%.

При изучении влияния количества диоксида титана на водопоглощение порошково-активированных бетонов на белом цементе с компонентами различной дисперсности и зернистости из мрамора было отмечено, что с увеличением дозировки диоксида титана незначительно уменьшаются значения водонасыщения. В первые часы водонасыщения образцов в воде контрольный состав поглотил 1% воды (ПАПБ-5) (рис. 5.12). За это же время образцы с диоксидом титана показывают значения водопоглощения ниже, чем у контрольного. Через длительное время экспонирования образцов в воде, а именно через 3 месяца, водопоглощение образцов бетона с 5% и 7% диоксида титана в 1,1 раза и 1,15 раза ниже значения контрольного состава, а также состава с 3% диоксида титана и составляют 2,2% (ПАПБ-7) и 2,16% (ПАПБ-8) соответственно. Это, вероятно, объясняется более полным заполнением микропустот высокодисперсными частицами  $TiO_2$ .

При использовании отходов дробления известняка в качестве наполняющих компонентов различного размерного уровня на белом Египетском цементе были получены значения, мало отличающиеся от значений водопоглощения бетонов с использованием отходов дробления и шлифовки мрамора. Стоит отметить крайне низкое водонасыщение по массе составов бетона на известняковых заполнителях (ПАПБ-9 – ПАПБ-12), особенно в первые часы нахождения в воде образцов, значение водопоглощения которых не превышает 0,9% (рис. 5.13).

Параллельно определяли капиллярное водонасыщение в течение одной недели в соответствии с EN 1015–18:2002 на балочках 40×40×160 мм, установленных в воду вертикально на глубину 7 мм. На протяжении всего испытания производили наблюдение за высотой подъема воды по перемещению видимой границы смачивания образцов и взвешивание их.

Кинетика капиллярного водонасыщения исследуемых бетонов представлена на рис. 5.14-5.16.

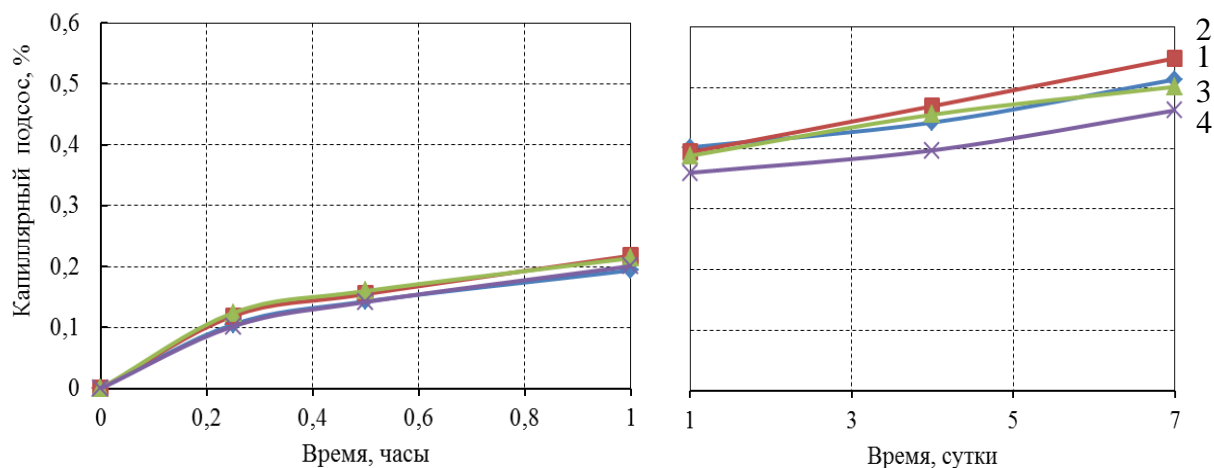


Рис. 5.14 Капиллярное водонасыщение окрашенного порошково-активированного бетона на сером цементе и гранитных компонентах с различным содержанием железистоокисного пигмента (черный):

- 1 – контрольный состав (ПАПБ-1); 2 – с 3% железистоокисного пигмента (ПАПБ-2); 3 – с 5% железистоокисного пигмента (ПАПБ-3); 4 – с 7% железистоокисного пигмента (ПАПБ-4)

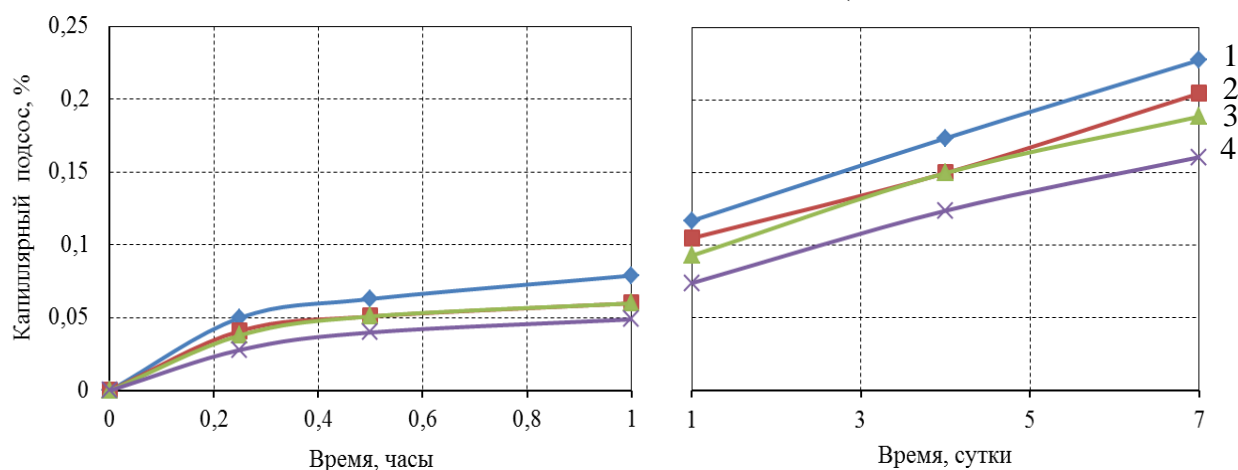


Рис. 5.15 Капиллярное водонасыщение порошково-активированного бетона на белом цементе и компонентах из мрамора с различным содержанием диоксида титана:

- 1 – контрольный состав (ПАПБ-5); 2 – с 3% диоксида титана (ПАПБ-6); 3 – с 5% диоксида титана (ПАПБ-7); 4 – с 7% диоксида титана (ПАПБ-8)

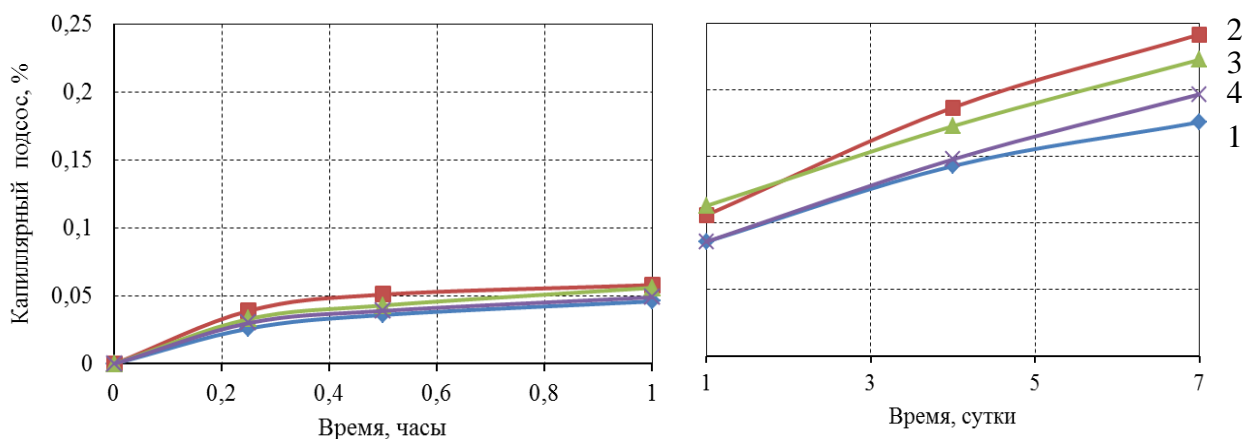


Рис. 5.16 Капиллярное водонасыщение порошково-активированного бетона на белом цементе и компонентах из известняка с различным содержанием диоксида титана:

1 – контрольный состав (ПАПБ-9); 2 – с 3% диоксида титана (ПАПБ-10);  
 3 – с 5% диоксида титана (ПАПБ-11); 4 – с 7% диоксида титана (ПАПБ-12)

Низкие значения капиллярного подсоса отмечены на образцах архитектурно-декоративного бетона на белом Египетском цементе (рис. 5.15 и рис. 5.16). Образцы бетона на известняковых наполняющих компонентах в первые часы испытания показали значения не более 0,06 %, а образцы бетона с использованием мраморных компонентов – не более 0,1%. За это же время образцы бетона на сером Вольском цементе с использованием гранитных компонентов различного размерного уровня насытились водой до 0,21% по массе.

Существенного различия в значениях капиллярного подсоса контрольных и окрашенных составов в первые часы эксперимента не обнаружено, независимо от дозировки и вида пигмента.

При более длительном капиллярном водонасыщении бетонов с пигментами (7 суток экспонирования) наблюдается незначительный разброс показателей. Так, капиллярное водонасыщение образцов бетона на белом цементе с диоксидом титана, наполненного мраморными компонентами, снижается с увеличением дозировки  $TiO_2$  (рис. 5.15). Бетоны на известняковых компонентах с диоксидом титана несущественно повышают водонасыщение от

капиллярного подсоса (рис. 5.16). Аналогичная картина для этих составов наблюдалась и при определении водопоглощения.

В период капиллярного водонасыщения производили наблюдение за высотой подъема жидкости по капиллярам по видимой границе смачивания. Результаты наблюдений показали, что на образцах архитектурно-декоративного бетона на белом цементе с мраморными и известняковыми компонентами наблюдалось меньшее значение высоты подъема воды (не превышающее 0,78 см), чем у составов на сером Вольском цементе с гранитными наполнителями и железистоокисным пигментом (черным), у которых высота подъема воды по капиллярам была чуть больше и составляла 1,19 мм.

В целом можно отметить низкие значения водопоглощения по массе и капиллярного подсоса всех составов, независимо от вида горной породы, используемой в качестве наполняющих компонентов, а также вида пигмента и его дозировки. Разработанные бетоны нового поколения удовлетворяют самым высоким требованиям по водопоглощению и капиллярному подсосу, предъявляемым к архитектурно-декоративным бетонам.

Следующим этапом наших исследований являлось изучение кинетики водопоглощения окрашенных бетонов с добавлением 5% красного пигмента (ПАПБ-20), 5% желтого пигмента (ПАПБ-21), 0,5% синего фталоцианинового красителя от массы цемента (ПАПБ-22). Составы бетонов представлены в табл. 5.3 главы 5. В качестве контрольного был принят состав белого бетона с известняковыми наполнителями различной дисперсности и зернистости – ПАПБ-9 (табл. 5.1)

Результаты исследования кинетики водопоглощения окрашенных порошково-активированных бетонов представлены в табл. 5.5.

Кинетика водопоглощения окрашенных архитектурно-декоративных бетонов на образцах-балочках размерами 40×40×160 мм

№ составов	Водопоглощение по массе %, через:								
	5 Мин	15 мин	30 мин	1 час	1 сут	3 сут	14 Сут	21 Сут	3 месяца
ПАПБ-9 Контрольный состав	0,377	0,539	0,645	0,768	1,338	1,599	1,930	2,039	2,34
ПАПБ-20 5% красный Ж/о пигмент	0,320	0,50	0,66	0,85	1,70	1,92	2,38	2,48	2,51
ПАПБ-21 5% желтый Ж/о пигмент	0,260	0,422	0,572	0,707	1,463	1,740	1,97	2,065	2,36
ПАПБ-22 0,5% синий Ф/ц краситель	0,253	0,447	0,639	0,785	1,644	1,98	2,39	2,55	2,76

Как видно из результатов исследований, при введении железистоокисных пигментов в дозировке 5% от массы цемента водопоглощение бетонов увеличивается незначительно. При введении фталоцианинового красителя значение водопоглощения относительно контрольного состава увеличивается на третьи и девяностые сутки испытания на 18-20%. Вероятно, это объясняется повышенной смачиваемостью органического красителя.

Капиллярное водонасыщение в течение 7 суток у всех окрашенных составов очень низкое и находится в пределах значений контрольного состава (ПАПБ-9).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о крайне низких показателях водопоглощения по массе разработанных окрашенных архитектурно-декоративных бетонов. В сочетании с высокими физико-механическими показателями это должно обеспечить высокую степень морозостойкости, что, в свою очередь, будет гарантировать долговечность и увеличение срока службы бетонов без потери эксплуатационных качеств.

#### **5.4 Деформации усадки и набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов**

В процессе приготовления, набора прочности, эксплуатации в бетонах происходят объемные изменения – деформации усадки и деформации набухания. Величина их зависит от содержания воды, структуры бетонов, свойств их составляющих, особенностей технологии изготовления и других факторов.

Усадочные деформации бетона обусловлены действием капиллярных сил и сил, возникающих при удалении свободной «межслойной воды» из слоев, образовавшихся между кристаллами новообразований в материале. Имеет место физико-химический характер усадочных деформаций. При этом усадка обусловлена удалением межкристаллической воды и объемными изменениями гелевой структурной составляющей при высыхании. Наряду с химической контракцией, обусловленной переходом свободной воды в твердое состояние продуктов гидратации цемента с увеличением плотности воды и образованием вакуума, протекает и физическая контракция. Она обусловлена упаковкой молекул воды в поверхностном слое частиц и более полным заполнением водой микро- и нанотрещин.

На сегодняшний день выдвинуто большое количество различных предположений и теорий, трактующих происхождение усадочных деформаций бетонов и роль их в общей усадке.

Величина усадки бетона зависит от многих факторов: вида и химико-минералогического состава используемых цементов, дисперсности, водоцементного соотношения, вида заполнителей и их объемного содержания, вида и количества вводимых добавок, условий и продолжительности твердения бетона.

В связи с тем, что в бетонах нового поколения количество дисперсных компонентов значительно выше, чем в бетонах старого поколения, то следует ожидать увеличения доли физической контракции в общей контракции. Нельзя исключить и тот факт, что вводимые пигменты с удельной поверхностью 2500-4000 м<sup>2</sup>/г, т.е. в 8-12 раз выше, чем у цемента, могут увеличивать физическую

контракцию. Поэтому изучение усадочных деформаций архитектурно-декоративного бетона с ультрадисперсными пигментами является актуальной задачей.

Применение современных СП и ГП в бетонах нового поколения (с высокой реологической активностью) способствует снижению усадочных деформаций за счет снижения водо-твердого отношения, создавая тем самым более плотную структуру бетона. В бетонах нового поколения, в частности порошковых и порошково-активированных, использование реологически-активных тонкомолотых наполнителей в сочетании с пластифицирующими добавками значительно увеличивает их водоредуцирующую активность.

Значительные усадочные деформации в бетонах могут привести к образованию микротрещин, а в дальнейшем – к понижению трещиностойкости бетона. Для минимальных значений усадочных деформаций очень важно, чтобы структура бетона была плотной и прочной. Также необходимо, чтобы бетон имел малые значения капиллярного водонасыщения и водопоглощения. Попеременные изменения влажности окружающей среды, в которой будут эксплуатироваться архитектурно-декоративные бетоны, приведут к «расшатыванию» структуры бетона и развитию микротрещин, а в дальнейшем и к его разрушению.

Для бетонов, к которым предъявляются требования по трещиностойкости, величина усадки должна нормироваться. Например, для гидротехнического бетона при относительной влажности воздуха 60% и температуре 18°C в возрасте 28 суток линейная усадка обычно допускается не более 0,3 мм/м, а в возрасте 180 суток – 0,7 мм/м [161].

В ранее выполненных работах кафедры ТБКиВ были показаны перспективы создания конструкционных порошковых и реакционно-порошковых бетонов нового поколения, имеющих низкие значения усадочных деформаций [20, 24, 25]. В то же время при аналитическом обзоре отечественной и зарубежной литературы нами не были выявлены сведения о значениях усадочных деформаций и деформаций набухания окрашенных архитектурно-декоративных бетонов нового поколения.



Поэтому в данном разделе нами представлены научные исследования по изучению влияния различных пигментов и дисперсного диоксида титана и их дозировок на деформации усадки и набухания высокопрочных бетонов с использованием дисперсных наполнителей: гранитная мука, известняковая мука и мраморная мука. Для изучения влияния порошковой гидрофобной добавки в архитектурно-отделочных бетонах были изготовлены составы со стеаратом цинка. Составы и физико-технические свойства исследуемых бетонов приведены в табл. 4.3 главы 4, табл. 5.1-5.3 главы 5 и в табл. 1-3 приложения 1.

Усадочные деформации бетонов и деформации набухания измеряли в соответствии ГОСТ 24544-81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести» на образцах-призмах размером 40×40×160 мм и призмах базового размера 100×100×400 мм. При формировании образцов на внутренние торцевые поверхности форм закрепляли реперы из нержавеющей стали с анкерующими отгибами, после чего формы заливали самоуплотняющейся порошково-активированной бетонной смесью. Деформации усадки фиксировали в течение 75 дней при колебаниях относительной влажности воздуха в диапазоне 55-60 %, а значения деформации набухания измеряли в течение 75 суток после выдерживания образцов в воде. Завершение испытаний в соответствии с ГОСТом определялось по минимальному приросту усадочных деформаций, не превышающему точность измерения. В соответствии с выведенной автором формулой [157] коэффициент, позволяющий пересчитать значения усадочных деформаций в призмах 40×40×160 мм на усадочные деформации призм базового размера 100×100×400 мм, равен  $K = 1,84$ . Поскольку в этих исследованиях рассматривались реакционно-порошковые бетоны с максимальной крупностью зерна, равной 0,63 мм, мы провели такие же испытания на порошково-активированных бетонах, в которых заменили часть песка фр. 0,16-0,63 мм на более крупный песок фр. 0,63-2,5 мм. Результаты экспериментов показали аналогичный коэффициент, равный 1,84.

Полученные значения деформации усадки и набухания бетонов представлены на графиках рис. 5.17-5.21

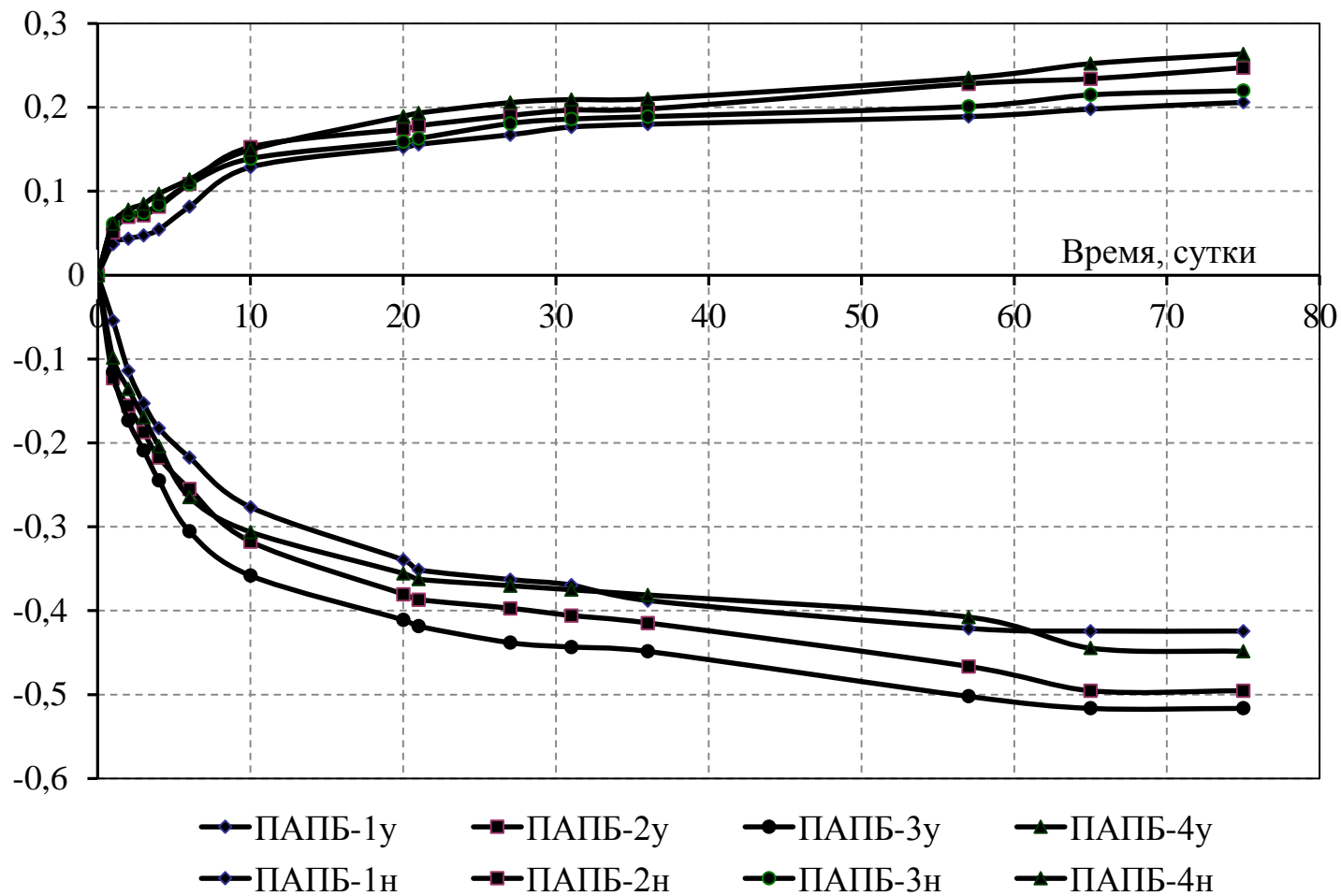


Рис. 5.17 Деформации усадки-набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на гранитной муке с различным содержанием черного пигмента:  
 1 – ПАПБ-1 (контрольный); 2 – ПАПБ-2 (3% пигмента); 3 – ПАПБ-3 (5% пигмента); 4 – ПАПБ-4 (7% пигмента)

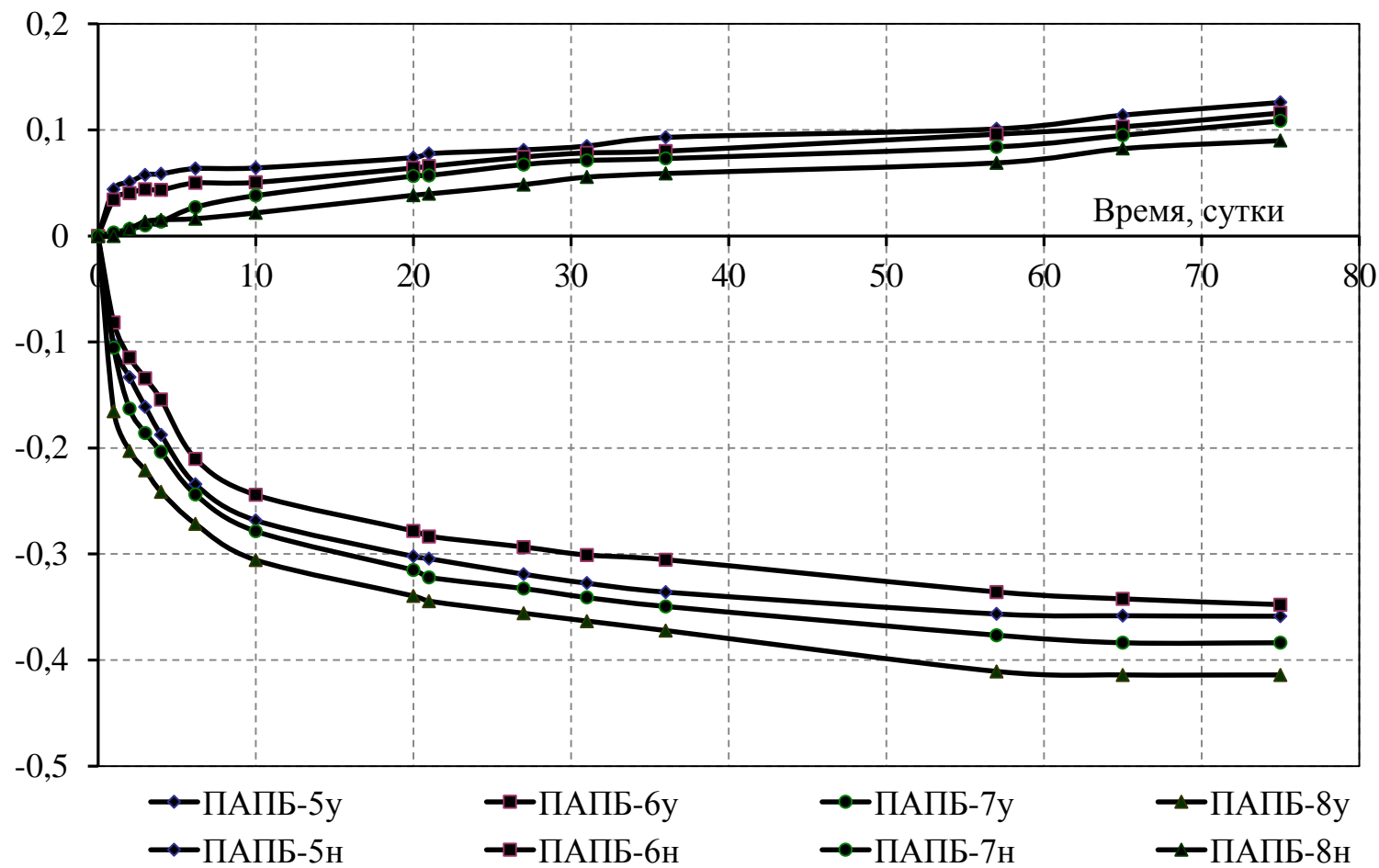


Рис. 5.18 Деформации усадки-набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на мраморной муке с различным содержанием диоксида титана:  
 1 – ПАПБ-5 (контрольный); 2 – ПАПБ-6 (3 % диоксида титана);  
 3 – ПАПБ-7 (5 % диоксида титана); 4 – ПАПБ-8 (7 % диоксида титана)

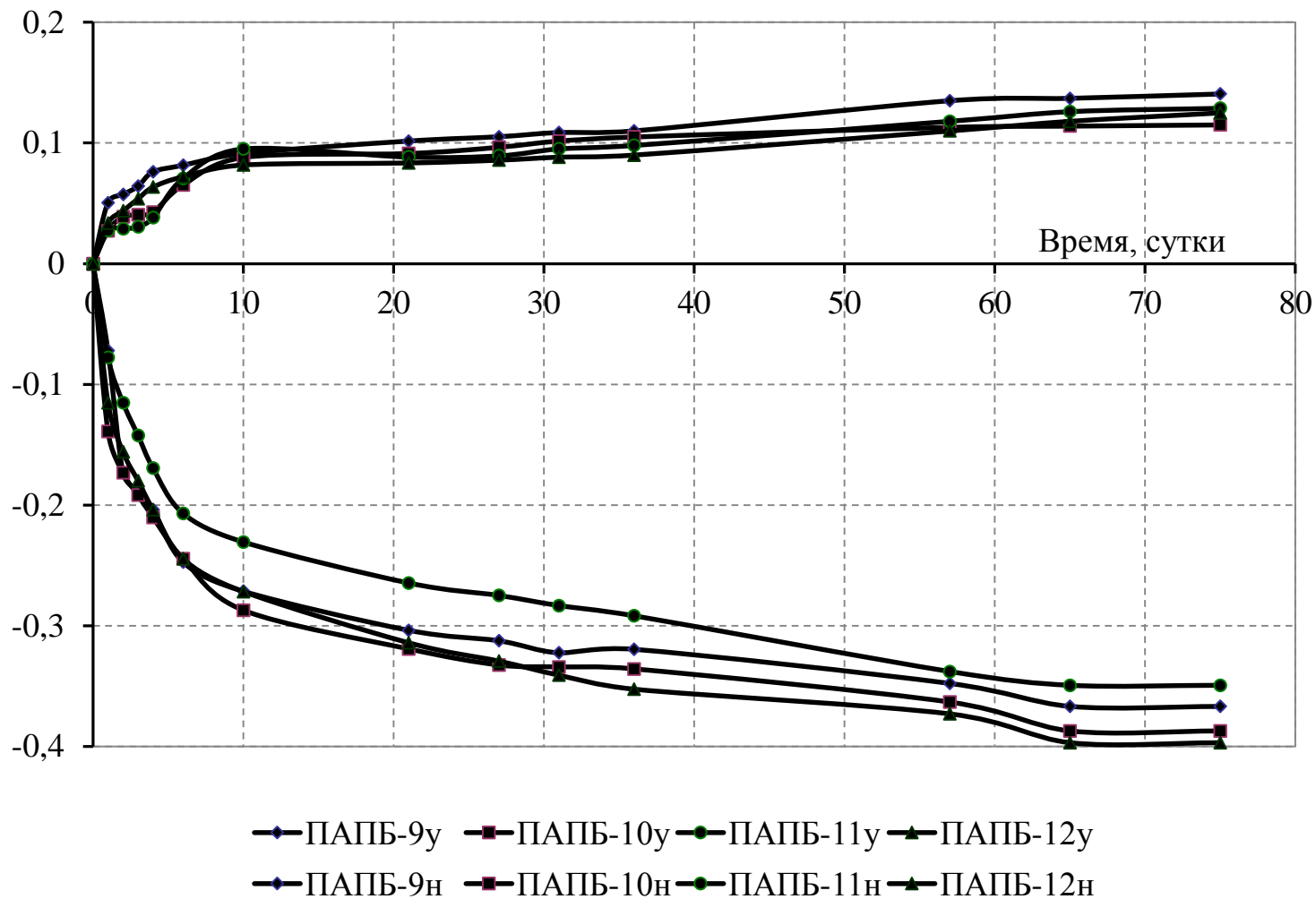


Рис. 5.19 Деформации усадки-набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на известняковой муке с различным содержанием диоксида титана:  
 1 – ПАПБ-9 (контрольный); 2 – ПАПБ-10 (3 % диоксида титана);  
 3 – ПАПБ-11 (5 % диоксида титана); 4 – ПАПБ-12 (7 % диоксида титана)

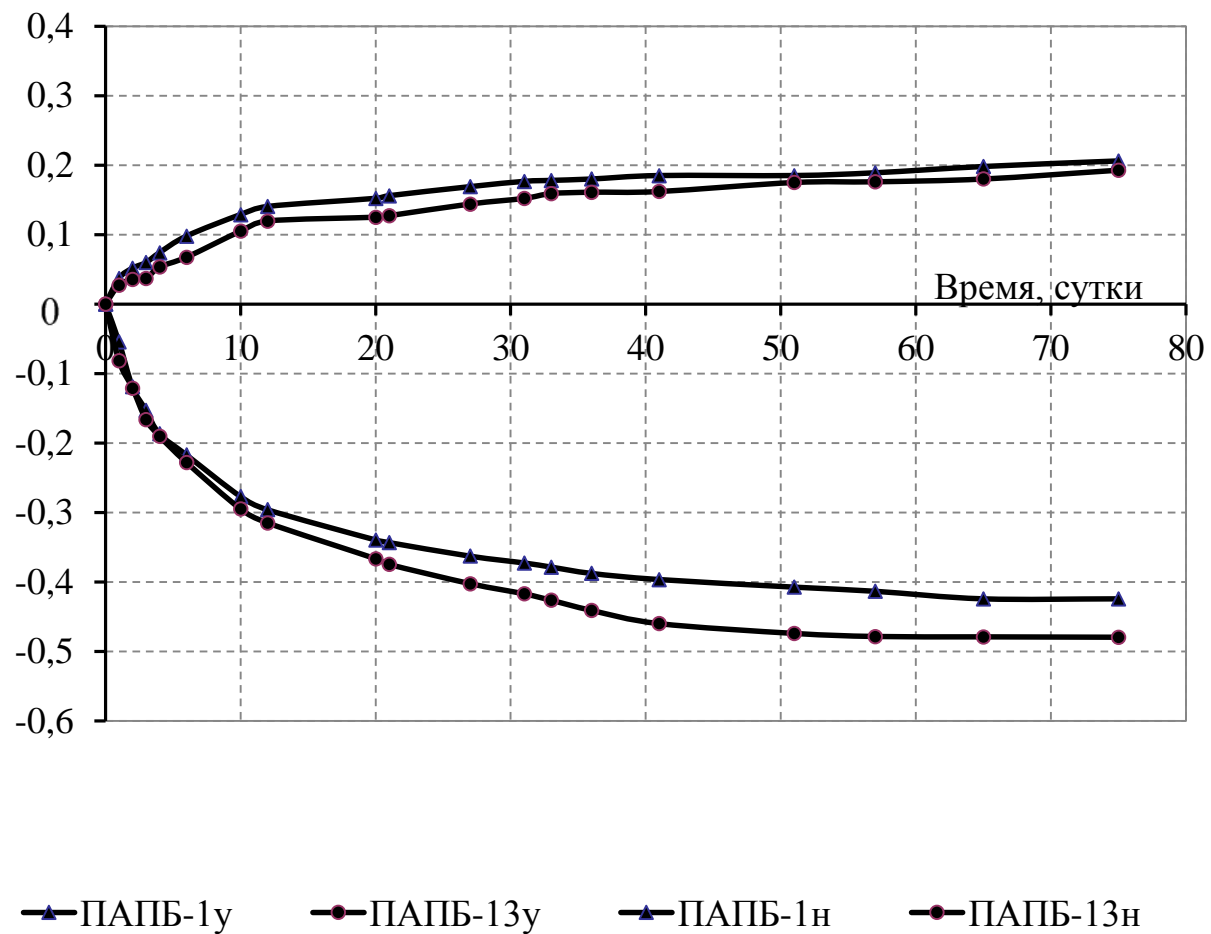


Рис. 5.20 Деформации усадки-набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на гранитной муке с гидрофобизирующей добавкой:  
 1 – ПАПБ-1 (контрольный); 2 – ПАПБ-13 (стеарат цинка)

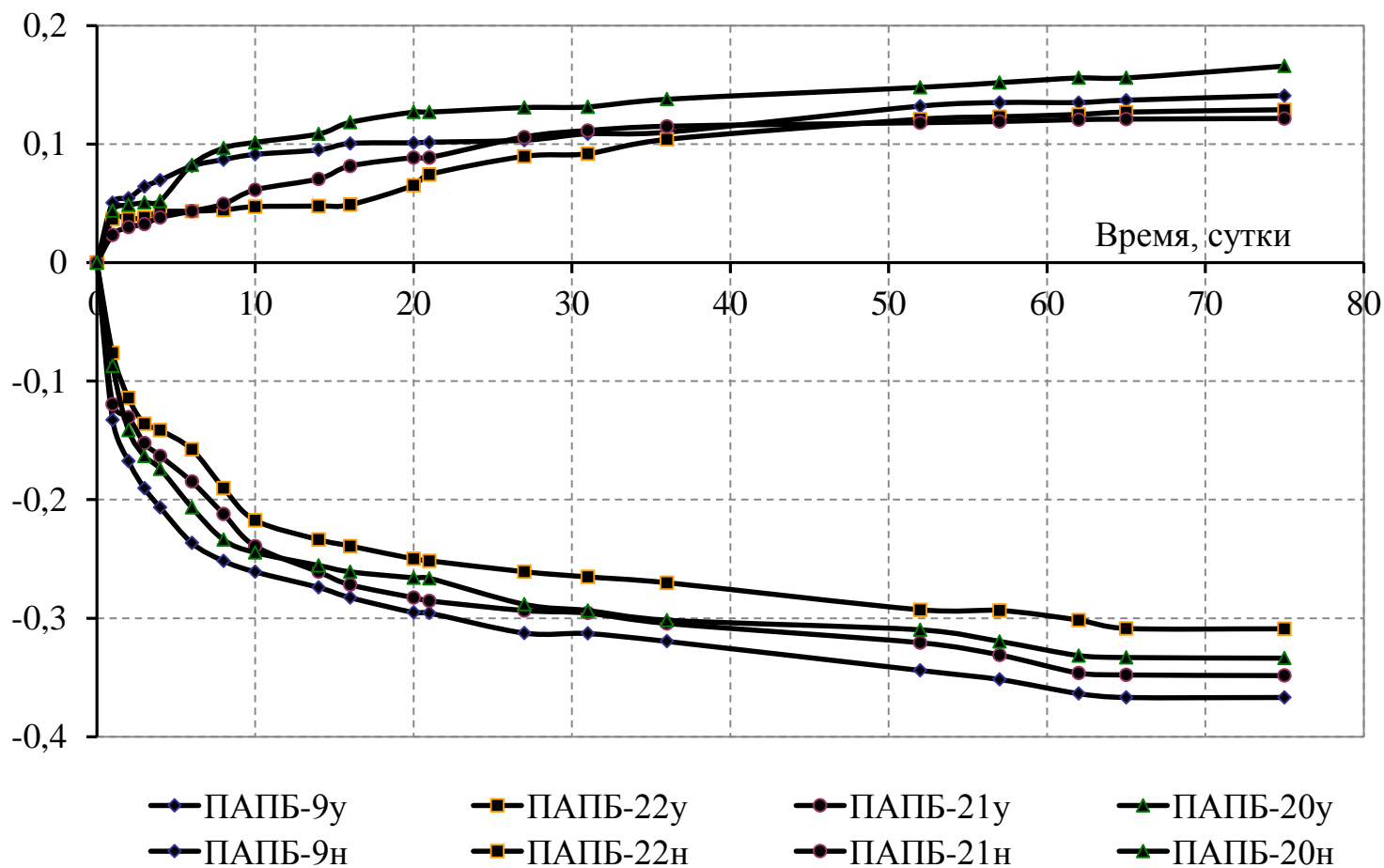


Рис. 5.21 Деформации усадки-набухания архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов на известняковой муке с различным типом пигмента и его содержания:

1 – ПАПБ-9 (контрольный); 2 – ПАПБ-18 (0,5 % синего пигмента);  
 3 – ПАПБ-19 (5 % желтого пигмента); 4 – ПАПБ-20 (5 % красного пигмента)

Деформации усадки бетонов на основе трех выбранных горных пород (известняк, мрамор, гранит) находились в диапазоне от 0,31 мм/м до 0,52 мм/м, а деформации набухания – от 0,06 мм/м до 0,2 мм/м. До 10 суток испытания деформации усадки на всех составах не превышали 0,34 мм/м.

При введении черного пигмента в архитектурно-декоративный порошково-активированный песчаный бетон на гранитной муке значения усадочных деформаций через 75 суток у контрольного состава ПАПБ-1у оказались меньше, чем у составов с пигментом: в 0,85 раза для состава ПАПБ-2у; в 0,82 раза для состава ПАПБ-3у; и в 0,95 раза для состава ПАПБ-4у (рис. 5.17). То есть у сравниваемых составов значения усадочных деформаций отличаются незначительно. Деформации набухания всех составов на гранитной муке с черным пигментом через 75 суток испытания не превышают значения 0,26 мм/м (рис.5.17).

Введение диоксида титана в бетон на мраморной муке понижает значения как усадочных деформаций, так и деформаций набухания (рис. 5.18).

Значения деформаций усадки не превышают значения 0,41 мм/м (с 7 % диоксида титана, состав ПАПБ-8н). Самые малые значения деформаций усадки в бетоне на мраморе – 0,31 мм/м (состав ПАПБ-6у с 3 % диоксида титана). Деформации набухания не превышают значения 0,13 мм/м. Стоит отметить, что значения усадочных деформаций и деформаций набухания остаются достаточно низкими и не превышают усадочных деформаций щебеночных бетонов старого и переходного поколений, изготовленных из виброуплотняемых жестких бетонных смесей.

На рис. 5.19 приведены значения усадочных деформаций и деформаций набухания бетона на известняковой муке с различным содержанием диоксида титана. Деформации набухания бетона в течение первых 10 суток не превышают значений 0,09 мм/м, а спустя месяц испытания все составы имеют практически одинаково низкие значения, не превышающие 0,1 мм/м. В начальные сроки испытания бетонов усадочные деформации как

контрольного состава, так и состава с диоксидом титана имели значения не выше 0,2 мм/м. Самое низкое значение усадочных деформаций через 75 суток испытания имеет бетон ПАПБ-11у с 5 % диоксида титана – 0,34 мм/м. Контрольный состав имеет значение 0,37 мм/м.

Изучено влияние порошковой гидрофобной добавки – стеарата цинка – в архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонах на гранитной муке (рис. 5.20). Отмечено положительное влияние стеарата цинка на уменьшение деформаций набухания бетона. В начальные сроки испытания бетона усадочные деформации контрольного состава и состава со стеаратом цинка равны, но с 10-х суток испытания заметна разница в значениях. Так, бетон со стеаратом цинка (ПАПБ-13у) имеет значения усадочных деформаций через 75 суток 0,47 мм/м, а контрольный состав (ПАПБ-1у) – 0,42 мм/м. Стеарат цинка уменьшает деформации набухания незначительно: состав с гидрофобной добавкой имеет значение 0,19 мм/м, контрольный состав – 0,20 мм/м на 75-е сутки.

Изучено влияние различных пигментов на усадочные деформации и деформации набухания окрашенного бетона на известняковой муке (рис.5.21). Самые большие значения усадочных деформаций через 75 суток имеют бетоны контрольного состава (состав ПАПБ-9у) – 0,37 мм/м. Бетон с 5% желтого пигмента (ПАПБ-19у) имеет усадку 0,35 мм/м, бетон с 5% красного пигмента (состав ПАПБ-20у) – 0,33 мм/м. Бетоны с 0,5% синего фталоцианинового красителя (ПАПБ-18у) имеют самые низкие значения усадочных деформаций – 0,31 мм/м. Самое низкое значение деформации набухания имеет бетон, окрашенный 5% желтым пигментом, – 0,12 мм/м через 75 суток (состав ПАСБ-18н). А самые высокие значения деформаций набухания имеют бетоны с 5% красного пигмента (состав ПАСБ-20н) – 0,16 мм/м.

Несмотря на то, что прогнозировалось увеличение контракционной усадки за счет введения ультрадисперсных пигментов, вследствие чего должны были увеличиться усадочные деформации бетонов с пигментами,



результаты эксперимента показали обратную картину. Это говорит о том, что оптимально подобранная структура бетона с малым содержанием воды влияет на уменьшение усадочных деформаций в большей степени, чем прирост контракционной усадки в общем значении.

В целом можно отметить, что разработанные нами архитектурно-декоративные порошково-активированные песчаные бетоны как контрольного состава, так и составы с различными окрашивающими компонентами, имеют достаточно низкие значения деформационных характеристик. При этом полученные значения деформационных характеристик смогут удовлетворить требованиям, предъявляемым не только к архитектурно-декоративным, но и к конструкционным бетонам.

### **5.5 Морозостойкость окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов**

Для архитектурно-декоративных бетонов, эксплуатирующихся в условиях природной окружающей среды, учитывая их назначение и условия эксплуатации, одним из основных критериев оценки долговечности, кроме выявленных усадочных деформаций, является морозостойкость. Под влиянием средовых воздействий окружающей среды архитектурно-декоративные бетоны подвергаются увлажнению и высушиванию, «замораживанию-оттаиванию», в зависимости от условий эксплуатации. По современным теориям разрушения пористых материалов от мороза [162] вода в порах бетона при отрицательных температурах кристаллизуется с увеличением объема. Лед создает высокие растягивающие напряжения на стенках пор, что приводит к разрушению материала. Помимо кристаллизационного давления льда, существует теория гидравлического давления воды на стенки пор от увеличения объема льда вследствие выдавливания влаги льдом от поверхности с более низкой температурой внутрь материала с более высокой. Таким образом, величина создаваемых напряжений и, как следствие, морозостойкость бетона зависят от пористой структуры материала. Принято считать, что с увеличением относительного

объема резервных пор в объеме бетона, т.е. с увеличением его условно-замкнутой пористости, морозостойкость повышается. Поэтому для достижения высокой морозостойкости в бетонные смеси необходимо вводить воздухововлекающие добавки с целью получения резервных сферических пор. Так, для повышения морозостойкости дорожных бетонов стандарты ряда стран регламентируют содержание вовлеченного воздуха не менее 5% от объема бетона.

Как правило, для бетонов старого поколения марка по морозостойкости не превышает F 300-400, что является вполне достаточным для высокой долговечности бетонов. Для архитектурно-декоративных окрашенных бетонов период эксплуатации до исчезновения декоративной выразительности поверхностей значительно сокращается.

Перед нами стояла задача существенного повышения морозостойкости без использования воздухововлекающих добавок цветных песчаных бетонов нового поколения на основе отходов камнедробления горных пород. Обзор отечественных и зарубежных источников литературы не выявил результатов исследований прочности и морозостойкости самоуплотняющихся архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов, в том числе окрашенных. Исходя из теоретических представлений, разработанных на кафедре «ТСМиД» ПГУАС, саморастекаемость, самонивелируемость и самоуплотняемость бетонных смесей определяется содержанием в них высококонцентрированной агрегативно-устойчивой водно-дисперсной суспензии. Суспензионными бетонами, состоящими из водно-дисперсной суспензии с дискретными включениями тонкого песка, являются достаточно известные порошковые и реакционно-порошковые бетоны. Все другие песчаные и щебеночные бетоны должны содержать высокое объемное количество водно-дисперсной суспензионной составляющей. В самоуплотняющихся песчаных бетонах содержание водно-дисперсной суспензии доходит до 40-60 %. Объем водно-дисперсной суспензии  $V_{\text{вд}}$  состоит из абсолютного объема дисперсии цемента, каменной

муки, высокодисперсного пигмента и воды. Объем водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии  $V_{вдт}$  складывается из объема водно-дисперсной суспензии и абсолютного объема тонкозернистой породы ( $\Pi_T$ ). Объем воды на эти суспензии условно равен объему воды затворения бетонной смеси. Объемные концентрации этих суспензий  $C_{вд}$  и  $C_{вдт}$  в бетонной смеси равны отношению объемов этих суспензий к объему бетонной смеси. Кроме этих определяющих реологию бетонных смесей характеристик, вычислялись условные реологические матрицы I рода – превышение объема водно-дисперсной суспензии над абсолютным объемом тонко-зернистой породы  $I_{\Pi_T}^{вд}$ , и условная реологическая матрица II рода  $I_{\Pi_3}^{вдт}$  – превышение объема водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии над объемом песка-заполнителя (дробленого горного песка):

$$I_{\Pi_T}^{вд} = (V_{вд} / \Pi_T) = (V_{ц} + V_{пм} + V_{п} + V_{в}) / V_T ; \quad (5.2)$$

$$I_{\Pi_3}^{вдт} = (V_{вдт} / \Pi_3) = (V_{ц} + V_{пм} + V_{п} + V_{в} + V_T) / V_3 . \quad (5.3)$$

Для проведения эксперимента была изготовлена серия образцов-кубов с размером ребра 100 мм. Состав бетона (табл. 5.6) представлен белым цементом (Ц), известняковым дисперсным наполнителем ( $\Pi_M$ ), тонким известняковым песком фракции 0,16-0,63 мм ( $\Pi_T$ ), известняковым песком-заполнителем фракции 0,16-0,63 мм ( $\Pi_3$ ) и пигментом (П). Все компоненты получены из отходов камнедробления плотного известняка фракции 0-5 мм. Дробимость известняка составляла Д1000. Для окрашивания бетона использовался железноокисный пигмент. Бетонная смесь была самоуплотняющейся с осадкой конуса 28 см, объемное содержание водно-дисперсной суспензии  $C_{вд}$  составляло 56 %, содержание водно-дисперсно-тонкозернистой  $C_{вдт}$  – 82 % (при условном распределении всей воды затворения на каждую суспензию), содержание дробленного известнякового песка-заполнителя была всего 18 %. Объемная концентрация твердой фазы в объеме бетонной смеси  $C_v^{тв}$  равна 80,2 %. Все значения объемных содержаний компонентов и условных реологических матриц бетонов

принимали в соответствии с ранее разработанными рецептурами и с новыми представлениями о порошково-активированных бетонах с повышенным содержанием суспензионных составляющих [181].

Таблица 5.6

Физико-технические свойства и реологические критерии архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона

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

Состав бетона подбирался исходя из полученных ранее результатов по определению прочностных и гигрометрических показателей. По кинетике водопоглощения можно проверить корректность прогноза морозостойкости бетона. Так, водопоглощение этого состава бетона через четверо суток составляло 1,04 % по массе. Через один месяц оно достигло значения 1,42 % и превысило 4-суточное водопоглощение на 30 %. То есть 30 % пор остаются свободными после водонасыщения бетона в течение четырех суток перед испытанием на морозостойкость. Таким образом, вода, увеличиваясь в объеме на 9,6 %, свободно перемещается под давлением в самые

легкодоступные поры из всех свободных, не заполненных водой. Очевидно, что трехкратное превышение объема свободных пор над приращением объема воды при переходе в лед должно гарантировать чрезвычайно высокую морозостойкость.

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 независимой лаборатории производственного предприятия ООО «Пензенское управление строительства» в морозильной камере отечественного производства типа КТХ-14 при температуре минус 50°С по режиму: 8 часов замораживания, 16 часов оттаивания.

На рис. 5.22 представлена кинетика изменения массы образца через каждые 200 циклов «замораживания-оттаивания», до 1000 циклов включительно.



Рис.5.22 Изменение массы образца в зависимости от увеличения количества циклов «замораживания-оттаивания»

Анализируя диаграмму, можно говорить о том, что, в отличие от потери массы бетонов старого и переходного поколений, при испытании на морозостойкость у бетонов нового поколения наблюдается прирост массы после 1000 циклов, равный 0,81% от массы образцов, насыщенных солевым

раствором перед началом испытания. Такой прирост массы свидетельствует об отсутствии деструктивных процессов, выраженных отшелушиванием бетона в поверхности и в угловых сопряжениях образцов бетона. Это подтверждается визуальной оценкой образцов-кубов до испытания и после 1000 циклов «замораживания-оттаивания» (рис. 5.23), что связано с чрезвычайно низким водопоглощением (0,8 % через 3 суток).

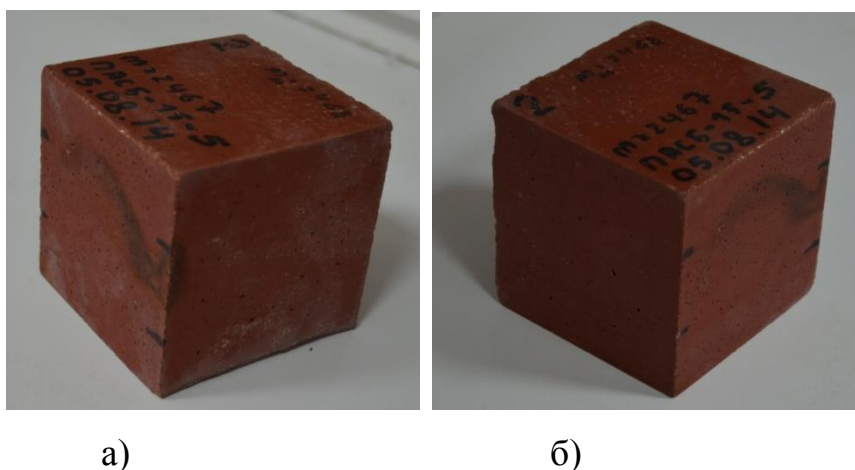


Рис. 5.23 Внешний вид образцов окрашенного порошково-активированного песчаного бетона после испытания на морозостойкость:

- а) образец, насыщенный в солевом растворе, перед началом испытания;
- б) образец после 1000 циклов «замораживания-оттаивания»

Деструктивные процессы, связанные с разрушением образца от мороза, не проявляются, а оттаивание в течение последующих 16 часов после циклов замораживания создает резерв прочности за счет протекающей гидратации цемента. Судя по кинетике изменения массы образцов, можно предположить, что прирост массы после 1000 циклов «замораживания-оттаивания» обусловлен длительным массопоглощением и стабилизируется. Возможно, после 1100-1200 циклов «замораживания-оттаивания» начнут преобладать деструктивные процессы с потерей массы и прочностных показателей до регламентируемых ГОСТом значений.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что после 1000 циклов «замораживания-оттаивания» вопреки ожиданиям наблюдается прирост массы образцов без видимых деструктивных изменений. А это гарантирует малую потерю прочности или сохранение ее. В связи с этим

было необходимым доказать отсутствие существенных деструктивных процессов и изменения прочности. Нормативный 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 солевом растворе, имели прочность 165 МПа. После 1000 циклов замораживания-оттаивания прочность образцов бетона повысилась до 162 МПа, т.е. потеря прочности составила 2 %, что находится в пределах ошибки опыта. Это подтверждает высказанную гипотезу (по результатам прироста массы образцов) о том, что конструктивные процессы структурообразования в высокоплотных, сверхвысокопрочных бетонах, бесспорно, продолжаются и в жестких условиях эксплуатации. 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). Закономерно и то, что в таком бетоне имеется достаточное количество резервных пор без использования воздухововлекающих добавок, обязательно рекомендуемых к применению стандартами всех стран для дорожных бетонов старого поколения. В бетонах это количество пор может быть небольшим, но вполне достаточным для размещения выдавливаемой в них воды в количестве 10% от всей поглощенной воды. А водопоглощение разработанных бетонов чрезвычайно малое – 0,8-1,5 % от массы, т.е. в 4-6 раз меньше, чем в бетонах старого поколения. Температурных напряжений и расшатывания структуры практически быть не должно, т.к. использована одна и та же горная порода для получения муки, тонкого песка и песка-заполнителя. Почти все компоненты различного размерного уровня имеют одинаковый коэффициент температурного расширения, за исключением цементного камня. А это дает основания утверждать, что морозостойкие бетоны являются также

термостойкими, изготовленными преимущественно из одинаковых по природе компонентов. Высокая термостойкость бетонов при градиентах температур, равных 800°C, доказана ранее в порошково-активированных самоуплотняющихся жаростойких бетонах, все компоненты которых изготовлены из шлака [182].

Кроме морозостойкости архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов, была изучена возможность сохранения декоративного вида поверхности путем поверхностной гидрофобизации. Результаты исследования представлялись особенно интересными исходя из того, что ранее в работе [112] автором было показано, что ни поверхностная, ни объемная гидрофобизация существенно не влияют на морозостойкость. Но эти исследования производились на минерально-шлаковых, достаточно пористых прессованных бетонах с маркой по морозостойкости не более F 400-500. Поэтому нами было исследовано влияние поверхностной гидрофобизации на морозостойкость высокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов. Для этого при испытании образцов на морозостойкость часть из них была пропитана в два слоя гидрофобизирующим раствором «Пента-824» с «уайт-спиритом» в соотношении 1:1. Результаты эксперимента на протяжении испытания на морозостойкость, до 1000 циклов «замораживания-оттаивания» включительно, не позволили выявить различия в показателях гидрофобизированных и контрольных составов, у которых наблюдался адекватный прирост прочности и массы образцов. Несмотря на снижение водопоглощения, особенно в первые сутки экспонирования бетона в воде, поверхностная гидрофобизация не оказывает заметного влияния на повышение морозостойкости сверхвысокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов. Но важным преимуществом поверхностно-пропиточной гидрофобизации является лучшее сохранение внешнего вида поверхности бетона. Учитывая, что поверхность гидрофобизированных архитектурно-декоративных бетонов не будет



подвергнута воздействию солевого раствора NaCl и постоянному действию отрицательных температур, равных минус 50°C, а лишь периодическому воздействию одностороннего косою дождя, можно с уверенностью гарантировать длительную эффективность защитного покрытия гидрофобизированного слоя.

Для разработанных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов характерны не только «рекордные» показатели прочности и морозостойкости, но и необычная картина разрушения образцов, представленная на рис. 5.24.

Отмечается, что при нагрузке на кубический образец с ребром 100 мм, равной 162 т, происходит «взрывное» разрушение образца с образованием большого количества пыли и разлетающихся осколков бетона.

Это свидетельствует о высокой хрупкости бетона. Для архитектурно-декоративных бетонов сверхвысокая прочность определяет и высокую функциональность бетона: низкие усадочные деформации, высокую коррозионную стойкость и водонепроницаемость, низкую ползучесть. Усадка исследуемого бетона чрезвычайно низкая – 0,3 мм/м, водонепроницаемость – более W20. Что касается высокой хрупкости бетона, которую часто оценивают по отношению прочности на сжатие  $R_{сж}$  к прочности на осевое растяжение или к прочности на растяжение при изгибе  $R_{и}$ , то  $R_{сж} / R_{и} = 7,3$ . У бетона с  $R_{сж} = 50$  МПа это отношение равно семи.

Хрупкий характер разрушения легко устраняется стальной, минеральной и углеродной фиброй. Важно то, что при исключении из состава АДБ пигмента такой бетон может быть высоконструкционным для изготовления железобетонных конструкций без использования дефицитного и дорогостоящего микрокремнезема.

Аналогичные высокопрочные самоуплотняющиеся неокрашенные бетоны получены нами при использовании всех дисперсных и зернистых компонентов из гранита, мрамора, базальта, диабазы и т.п. в качестве основных составляющих бетонной смеси.



Рис. 5.24 Испытание образца-куба с ребром 100 мм окрашенного порошково-активированного песчаного бетона после 1000 циклов «замораживания-оттаивания» при предельной нагрузке 162 т:

а) начало испытания образца; б) момент пылеобразования при «взрывном» разрушении; в) образец после разрушения

В настоящее время появились карбонатные цементы низкой водопотребности, полученные совместным домолом цемента с известняком, на основе которых созданы высокопрочные бетоны [111]. Как следует из результатов наших исследований, при расширении возможности использования прочных известняков на всю номенклатуру дисперсно-зернистых компонентов мелкозернистого бетона могут быть достигнуты очень высокие технические показатели.

Технология порошковой активации «восторжествует», как бы долго ни выпускались в России бетоны старого поколения с СП. Главное, что все компоненты бетонной смеси, кроме цемента, получены из многотоннажных отходов камнедробления, которые буквально «лежат под ногами».

#### **5.6 Разработка составов порошково-активированных песчаных бетонов с пониженными расходами цемента на основе отходов камнедробления горных пород**

Проведенные нами исследования по созданию архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов были ориентированы, в первую очередь, на выпускаемые за рубежом и разрабатываемые на кафедре «ТСМиД» Пензенского ГУАС в период с 2003 г. порошковые и реакционно-порошковые бетоны нового поколения [7, 8, 10, 20, 25, 74]. Анализ литературных источников позволил заключить, что оптимальные составы самоуплотняющихся (СУБ) реакционно-порошковых бетонов с прочностью более 100-120 МПа предполагали расход цемента 700-750 кг/м<sup>3</sup> и добавление микрокремнезема в количестве 15% от массы цемента. Такой расход цемента принимался с учетом оптимизации порошковой матрицы из микрокварца и микрокремнезема и добавления тонкого песка фракции 0,1-0,5÷0,16-0,63 мм. Наша рабочая гипотеза состояла в том, чтобы заменить в реакционно-порошковых бетонах часть тонкого песка фр.0,16-0,63 мм крупным песком-заполнителем фр.0,63-2,5 мм на 30-35 % и отказаться от реакционно-активного компонента – микрокремнезема, повышающего прочность, но увеличивающего себестоимость на 700 руб. за 1 м<sup>3</sup> бетона. В данном случае

мы преследовали цель максимального вовлечения в производство отходов и отсеков камнедробления, остающихся на карьерах и горных выработках. Кроме того, введение крупнозернистых частиц песка позволяет выявлять выразительную декоративную фактуру поверхности при ее обработке, в том числе раствором соляной кислоты и при пескоструйной обработке.

В результате проведенных исследований были получены высокопрочные долговечные архитектурно-декоративные бетоны, основой которых являются наполнители различного размерного уровня одинаковой природы происхождения. При этом используются отходы камнедробления горных пород. По своим качественным и эксплуатационным характеристикам разработанные порошково-активированные песчаные бетоны мало уступают порошковым и реакционно-порошковым бетонам, а по многим показателям превосходят их, что подтверждается результатами экспериментов (главы 4-5). Полученные нами бетоны с расходом цемента 700-730 кг/м<sup>3</sup> входят в разряд сверхвысокопрочных с прочностью на сжатие более 150 МПа и морозостойкостью свыше F 1000, что обеспечивает их высокую долговечность. По прогнозам японских ученых, при морозостойкости F1000 бетон служит не менее 500 лет с сохранением эксплуатационных характеристик. Такой длительный срок службы для архитектурно-декоративного бетона не является необходимым, т.к. за столь длительный промежуток времени изделия из бетона и их декоративные поверхности могут морально устареть уже через 100-150 лет.

В связи с этим на заключительном этапе выполнения диссертационной работы нами была изучена возможность значительного снижения расхода цемента с целью существенного удешевления себестоимости бетона. При этом мы добивались незначительного снижения качественных и эксплуатационных характеристик. В результате теоретических изысканий и большого числа экспериментальных наработок нами была подобрана оптимизированная матрица порошково-активированного песчаного бетона с расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup>.

Для сравнения и анализа возможностей снижения расхода цемента и увеличения в объеме бетонной смеси доли более крупной фракции песка было изготовлено 2 состава с расходами цемента 400 кг/м<sup>3</sup> и 700 кг/м<sup>3</sup>. Выбор сочетания цемента и горной породы, используемой в качестве наполнителей различных размерных уровней, был обусловлен результатами исследований, полученными ранее, и возможностью придания бетону определенной степени белизны без использования дорогого разбелителя в виде диоксида титана. Методика приготовления бетонных смесей с расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup> не отличалась от методики приготовления порошково-активированных песчаных бетонов с расходом цемента 700 кг/м<sup>3</sup>.

Физико-технические и реотехнологические показатели разработанных бетонов приведены в табл.5.7.

Анализируя табличные данные видно, что доля цемента была снижена с 700 до 400 кг/м<sup>3</sup>, количество каменной муки и тонкого песка фр.0,16-0,63 мм изменилось незначительно, а 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 вододисперсной тонкозернистой матрицы в смеси уменьшился на 19%, при этом смесь осталась самоуплотняющейся, соответствующей по американской классификации марке SF2, с осадкой стандартного конуса ОК<sub>ст</sub>=26,6 см. Плотность бетона повысилась на 92 кг/м<sup>3</sup> и составила 2588 кг/м<sup>3</sup>. 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/м<sup>3</sup>. При этом один из основных критериев, характеризующих бетон нового поколения – расход цемента на единицу прочности составил всего 3,48 кг/МПа.

Таблица 5.7

Физико-технические свойства и реологические критерии порошково-активированных песчаных бетонов с различным содержанием цемента

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>М</sub> Ц	Π <sub>Т</sub> Ц	Π <sub>З</sub> Ц	Прочность МПа, через, сут.		
								1	7	28
ПАПБ-5										
Портландцемент Египетский белый 52,5 СЕМ	700	225,8	0,285	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =66	R <sub>сж</sub> =113	R <sub>сж</sub> =127
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2496						
Мрамор молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /Г	300	103,4	0,091	ρ <sub>теор</sub>	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,21 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,79			Π <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> = 5,5 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,18 МПа/кг Π <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 36,6 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,65		
Песок тонкий мраморный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		K <sub>уп</sub>						
Песок крупный мраморный (Π <sub>З</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	162	Распływ конуса Хегерманна 36 см, ОКст 28,5 см	0,985						
ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—								
ΣV <sub>сух.</sub>	—	738								
Вода	200	200								
M <sub>б.с.</sub>	2377	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	938								
ПАПБ-24										
Портландцемент Египетский белый 52,5 СЕМ	400	129	0,4	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,87	1,55	2,6	R <sub>сж</sub> =54	R <sub>сж</sub> = 86	R <sub>сж</sub> = 115
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	4	3		2588						
Мрамор молотый (Π <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /Г	350	120,7	0,067	ρ <sub>теор</sub>	I <sub>Π<sub>Т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 1,94 I <sub>Π<sub>З</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 1,75			Π <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> = 3,48кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,28МПа/кг Π <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 27,2 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 7,82		
Песок тонкий мраморный (Π <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	620	213,8		K <sub>уп</sub>						
Песок крупный мраморный (Π <sub>З</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	1040	358,7	Распływ конуса Хегерманна 30 см, ОКст 26,9 см	0,992						
ΣM <sub>сух.</sub>	2414	—								
ΣV <sub>сух.</sub>	—	825,2								
Вода	163	163								
M <sub>б.с.</sub>	2577	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	988,2								

Параметром сравнительной оценки дальнейшего прироста прочности составов с различным содержанием цемента являлась кинетика ее набора после полугода твердения в нормально-влажностных условиях. При испытании образцов на сжатие прочность бетона ПАПБ-5 увеличилась на 17%, со 127 МПа до 154 МПа. За это же время прирост прочности бетона ПАПБ-24 составил 9,5 %, т.е. прочность на сжатие возросла до 127 МПа.

Также были изучены окрашенные порошково-активированные бетоны с расходом цемента  $400 \text{ кг/м}^3$  (табл. 5.8). Стоит отметить, что введение пигмента в состав в дозировке 5 % от массы цемента несущественно изменило физико-технические и реотехнологические характеристики бетонных смесей. В этом случае наиболее важной задачей была оценка насыщенности цвета при такой дозировке. Количество оксидного пигмента брали от массы цемента. В случае бетонов с расходами цемента  $700 \text{ кг/м}^3$  количество пигмента составляло  $35 \text{ кг/м}^3$  от суммарной массы бетонной смеси. В составе бетона с расходом цемента  $400 \text{ кг/м}^3$  общее количество пигмента по массе бетонной смеси составило на 43 % меньше.

При этом оттенок и насыщенность цвета на составе с меньшим содержанием цемента оказались не хуже, чем на составе с содержанием цемента  $700 \text{ кг/м}^3$ . Вероятно, это связано с тем, что высокодисперсный порошковый пигмент, окрашивая вододисперсную систему, создает цвет матрицы, а частицы песка более высокого размерного уровня не играют существенной роли при окраске бетона. Таким образом, в бетонах с различным содержанием цемента при одинаковом отношении пигмента к доле вододисперсной матрицы в объеме бетонной смеси насыщенность цвета будет отличаться незначительно.

Учитывая то, что мы разрабатывали архитектурно-декоративные бетоны, к которым применяются специфические требования при эксплуатации, необходимо было провести сравнительный анализ не только по прочностным показателям, которые, как оказалось, отличаются

несущественно, но и по другим параметрам, в частности водопоглощению по массе.

Таблица 5.8

Физико-технические свойства и реологические критерии архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона с различным содержанием цемента

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	$\frac{\Pi_{\text{м}}}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_{\text{т}}}{\text{Ц}}$	$\frac{\Pi_{\text{з}}}{\text{Ц}}$	Прочность МПа, через, сут.			
								1	7	28	
ПАПБ-25											
Портландцемент Египетский белый 600Д0	400	129	0,4	ρ <sub>вл</sub> 1 сутки	0,87	1,55	2,6	R <sub>сж</sub> = 56	R <sub>сж</sub> = 87	R <sub>сж</sub> = 114	
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	4	3		2595	$\frac{\sum \Pi}{\text{Ц}} = 5,02$			R <sub>из</sub> = 8,2	R <sub>из</sub> = 10,6	R <sub>из</sub> = 14,4	
Мрамор молотый (П <sub>м</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /г	350	120,7	0,067	ρ <sub>теор</sub> 2617	И <sub>П<sub>т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 1,96			Ц <sub>Р<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> = 3,51 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> = 0,28 МПа/кг Ц <sub>Р<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 27,7 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 7,91			
Песок тонкий мраморный (П <sub>т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	620	213,8			K <sub>уп</sub>	И <sub>П<sub>з</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 1,76					
Песок крупный мраморный (П <sub>з</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	1040	358,7				0,991	V <sub>вд</sub> = 419,6				
Пигмент красный 5% от Ц	20	3,9			C <sub>вд</sub> = 42,3 %						
ΣM <sub>сух.</sub>	2434	—	Расплав конуса Хегерманна 32 см, ОКст 27,5 см	V <sub>вдт</sub> = 633,4							
ΣV <sub>сух.</sub>	—	829,1		C <sub>вдт</sub> = 63,8%							
Вода	163	163		C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 83,5 %							
Мб.с.	2597	—									
V <sub>б.с</sub>	—	992,1									

Согласно методике определения водопоглощения по ГОСТ 12730.3-78 – «Бетоны. Метод определения водопоглощения» испытания следует проводить на образцах-кубах с размером ребра 100 мм. Ранее в своих исследованиях (глава 4, п.4.3) мы определили зависимость водопоглощения для порошково-активированного песчаного бетона от масштабного фактора и экспериментальным путем получили коэффициенты пересчета значений водопоглощения с образцов-балочек размерами 40×40×160 мм на образцы-кубы 100×100×100 мм. Поэтому для определения водопоглощения нами



были изготовлены образцы-балочки  $40 \times 40 \times 160$  мм. Это позволило значительно увеличить объем исследований и получить значения водопоглощения для большого количества образцов разного состава. На рис. 5.25 представлена кинетика водонасыщения порошково-активированных песчаных бетонов с расходами цемента  $700 \text{ кг/м}^3$  и  $400 \text{ кг/м}^3$ , исходя из испытаний водопоглощения на образцах-балочках  $40 \times 40 \times 160$  мм. Реальные показатели значений водопоглощения представленных составов при оценке водопоглощения на образцах-кубах с ребром 100 мм, согласно ГОСТу, будут существенно ниже. В течение трех суток значения водопоглощения балочек  $40 \times 40 \times 160$  мм, представленные на рис.5.25 будут ниже в среднем в два раза (табл.5.4).

Как видно из рис. 5.25, через трое суток водопоглощение по массе порошково-активированного бетона ПАПБ-24 с расходом цемента  $400 \text{ кг/м}^3$  на 44 % ниже, чем у бетона ПАПБ-5 с расходом цемента  $700 \text{ кг/м}^3$ . В течение месяца экспонирования образцов в воде отношение значений водопоглощения составов ПАПБ-24 и ПАПБ-5 остается в пределах 43-45%. Вероятно, это связано с более плотной структурой бетона ПАПБ-24. С большой долей вероятности можно говорить о высокой морозостойкости бетона ПАПБ-24, которая должна быть адекватной морозостойкости бетонов с расходом цемента  $700 \text{ кг/м}^3$  (гл.5, п.5.5). Анализ кинетики водопоглощения показал практически нулевые значения водопоглощения по массе в первые часы экспонирования образцов в воде. Такая картина водонасыщения образцов с течением времени особенно важна для архитектурно-декоративных бетонов, доказывая их возможность в течение длительного времени сохранять первоначальный вид декоративной поверхности.

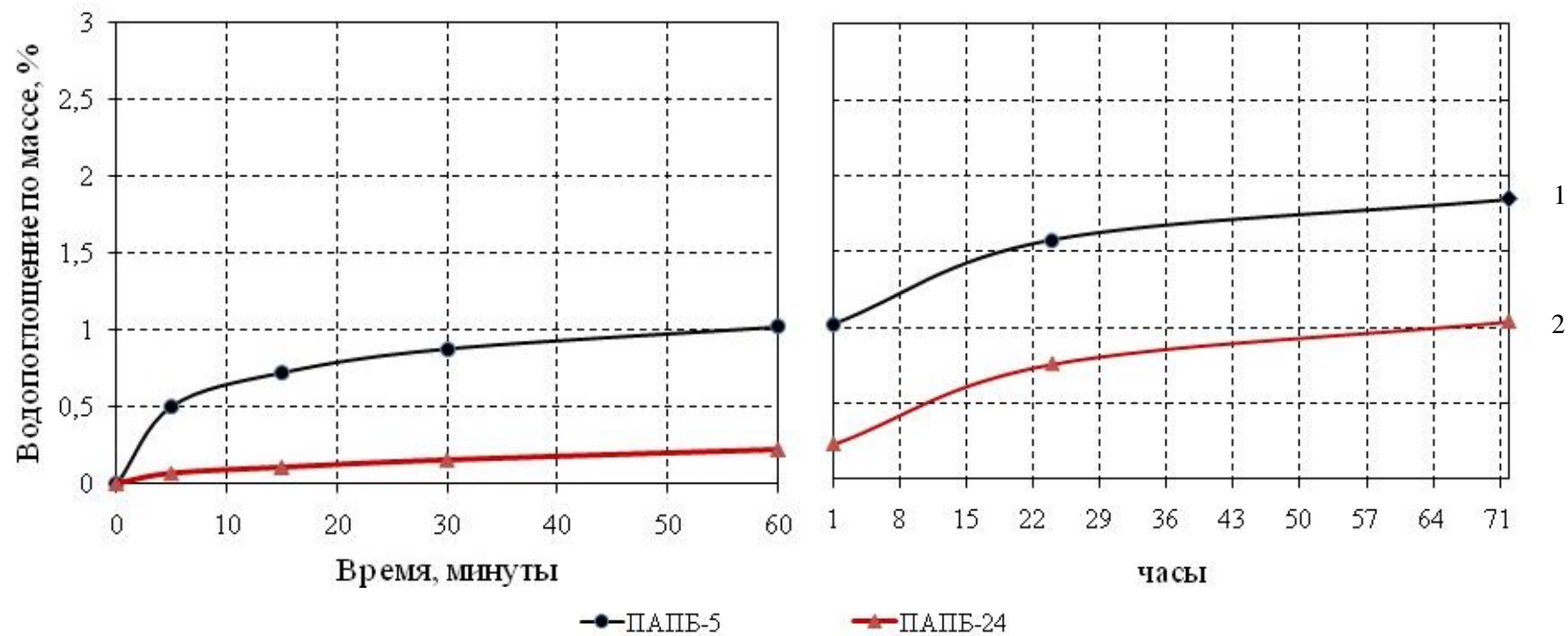


Рис. 5.25 Водопоглощение по массе архитектурно-декоративного порошково-активированного песчаного бетона:

1 – состав с расходом цемента 700 кг (ПАПБ-5);

2 – состав с расходом цемента 400 кг (ПАПБ-24).

Таким образом, разработаны порошково-активированные песчаные бетоны с расходом цемента, пониженным на 43%, которые по своим прочностным и гигрометрическим показателям мало уступают порошково-активированным песчаным бетонам с содержанием цемента, равным 700 кг/м<sup>3</sup>. Это имеет значительную экономическую эффективность, учитывая стоимость белого цемента, которая достигает 9000 руб./т. Кроме того, в связи с уменьшением расхода цемента использование в промышленных масштабах порошково-активированного песчаного бетона нового поколения способствует решению эколого-экономических вопросов, поскольку замена тонкого песка необходимой фракции более крупнозернистыми отсевами открывает широкие перспективы использования многотоннажных отходов камнедробления горных пород.

Возможность варьировать содержание цемента в архитектурно-декоративных бетонах при сохранении близких показателей эксплуатационных характеристик позволяет рассчитывать экономическую эффективность по наиболее оптимальным составам порошково-активированных песчаных бетонов с меньшей себестоимостью.

### **Выводы по 5 главе**

1. Впервые получены высокопрочные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны по микротехнологиям без использования реакционно-активного нанометрического микрокремнезема с применением микрометрических и миллиметрических частиц в виде известняковой и мраморной муки, тонкого дробленого песка и песка-заполнителя из этих горных пород с прочностью на сжатие 125-144 МПа.

2. 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.

3. Выявлена позитивная роль минеральных пигментов, в частности диоксида титана, в повышении прочности (до 7-9%) порошково-активированных суспензионных бетонов нового поколения. Методом рентгено-фазового анализа установлено формирование новой структурообразующей фазы в системе « $\text{TiO}_2\text{-Ca(OH)}_2$ » и сохранение фотокаталитического диоксида титана в значительном количестве в свободном виде в структуре архитектурно-декоративного бетона.

4. Выявлены закономерности улучшения гигрометрических свойств архитектурно-декоративных 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 %.

5. Получены самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны со сверхвысокой морозостойкостью, выдерживающие 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания без потери массы, с сохранением прочности, что гарантирует при малом водопоглощении и низких усадочных деформациях их высокую долговечность.

6. Высокие физико-технические и гигрометрические свойства архитектурно-декоративных бетонов позволили разработать более экономичные самоуплотняющиеся бетоны с прочностью на сжатие 115 МПа, с низким расходом цемента – 400 кг/м<sup>3</sup>, с очень низким удельным расходом цемента на единицу прочности при сжатии – 3,5 кг/м<sup>3</sup>, что не исключает использования их в качестве конструкционных при дисперсном или стержневом армировании.

## **ГЛАВА 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ И ПРОЦЕДУРА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ АРХИТЕКТУРНО- ДЕКОРАТИВНЫХ БЕТОНОВ**

### **6.1 Технологическая схема производства окрашенных порошково-активированных песчаных бетонов и процедура их изготовления**

Технология приготовления порошково-активированных песчаных бетонов предполагает подготовку и использование 7-8 исходных компонентов, в отличие от бетонов старого и переходного поколений, в которых их число, как правило, находится в пределах 3-5. Увеличение количества компонентов различного размерного уровня в бетонной смеси позволяет создавать оптимальную топологическую структуру с минимальным присутствием макро- и микродефектов. Рационально подобранная структура с использованием реакционно-активных и реологически-активных компонентов позволяет существенно понижать расход ценообразующего компонента – цемента.

Проведенные исследования показали целесообразность применения отходов камнедробления горных пород в качестве наполнителей различного размерного уровня в архитектурно-декоративных бетонах, в том числе окрашенных. Результаты испытания подтвердили предположение о возможности создания высокоэффективных долговечных порошково-активированных песчаных бетонов на основе тонкомолотых минеральных добавок фр. 0,16-0,63 мм и фр. 0,63-5,0 мм. А введение в состав окрашивающих компонентов, а также предложенные выше способы формообразования и формирования декоративной поверхности таких бетонов позволяют органично интегрировать их в ландшафтный дизайн и архитектуру зданий и сооружений.

Ранее в обзоре литературных источников были приведены данные о добыче и обработке природных ископаемых на карьерах и горнодобывающих предприятиях России. Основная доля добытых каменных пород идет на изготовление щебня фр. > 5 мм. При этом образуется огромное количество (до 20-30%) отсевов фр. < 5 мм, которые образуют многотоннажные отвалы и

хвостохранилища, занимая большие территории и нарушая экологический баланс регионов. Лишь в небольшом объеме такие отходы используются в качестве сырья для приготовления известняковой муки и минерального порошка для асфальтобетона.



Рис. 6.1. Технологическая схема производства фракционированных наполнителей и заполнителей из отсевов камнедробления

Исходя из этого, нами предложена технологическая схема производства фракционированных наполнителей и заполнителей из отходов камнедробления различных горных пород, максимальный размер которых не превышает 5 мм (рис. 6.1). Отсев камнедробления подвергается сушке, а затем сортируется по фракциям. Фракции 0,16-0,63 и 0,63-5,0 мм транспортируются в силосы для хранения и последующей отгрузки потребителю. Более мелкая фракция 0-0,16 мм идет на помол до удельной поверхности, близкой к цементу, равной 3000-5000 см<sup>2</sup>/г, а затем в силосы,

где хранится до отправки потребителю. При недостатке этой фракции для приготовления каменной муки помолу частично подвергаются более крупные фракции 0,16-5,0 мм. Для приготовления каменной муки рекомендуется использовать планетарную мельницу непрерывного действия.

Полученные фракционированные наполнители и заполнители можно использовать для приготовления архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов. Это предполагает подготовку 3 исходных компонентов бетонной смеси (каменной муки, тонкого песка фр.0,16-0,63 мм и песка-заполнителя фр.0,63-2,5 (5,0) мм). При этом исключается введение дорогостоящего микрокремнезема, суммарное производство и запасы которого не могут в полной мере удовлетворить производство бетонов в России.

На рис. 6.2 представлена технологическая схема производства окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов, включающая перечень необходимого оборудования и сырьевых материалов.

Исходные компоненты дозируются и поступают в конусный смеситель. Перемешивание порошково-активированной песчаной бетонной смеси рекомендуется проводить поэтапно с использованием смесителей с регулируемым числом оборотов. На первом этапе перемешивается водно-дисперсная суспензия (цемент – каменная мука – пигмент – раствор СП или ГП – вода) с повышенным числом оборотов (до 600-700 об/мин), на втором – при сниженной скорости перемешивания добавляется более крупный песок-заполнитель. Такое последовательное перемешивание позволяет получить высокооднородную микрометрическую суспензию и более высокие реотехнологические показатели бетонной смеси. В качестве смесителя рекомендуется использовать самоочищающийся конусный смеситель «Rotoconix» фирмы Skako Concrete с двумя рабочими органами с регулируемой скоростью перемешивания [166]. Достоинство этого смесителя состоит в том, что он регулирует содержание воды и консистенцию бетонной смеси.

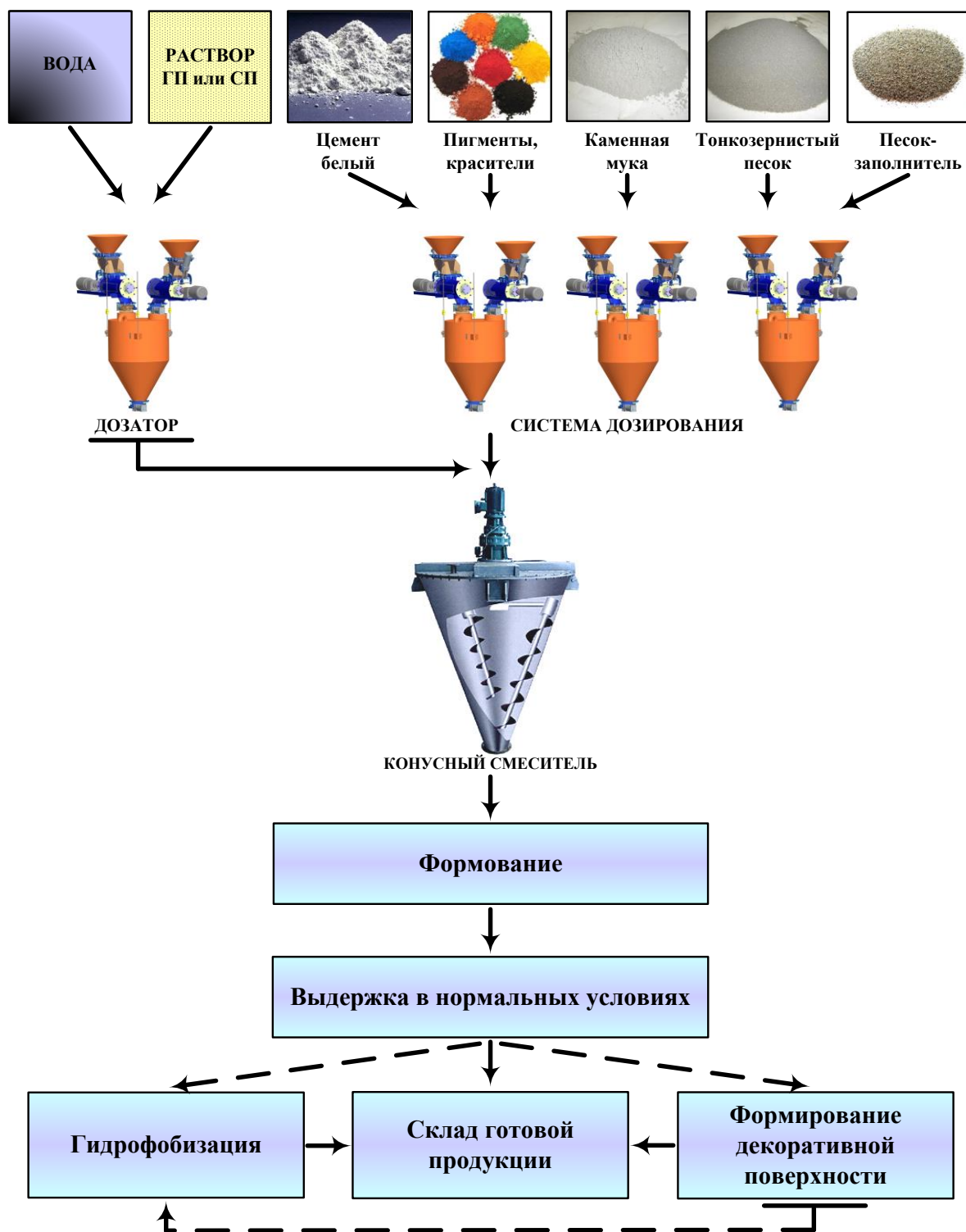


Рис. 6.2. Технологическая схема производства архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов

Следующий этап – формование и распалубка. После формования и распалубки изделия выдерживаются в нормальных условиях, после чего отправляются на склад готовой продукции. На этом этапе для исключения аутогенной усадки в бетонную смесь можно добавлять вещества по внутреннему уходу за бетоном, в частности суперадсорбирующие полимеры



(САП) [167, 168]. Учитывая кинетику набора прочности в ранние сроки твердения, нет необходимости применять дополнительную тепловлажностную обработку. При необходимости изделия после выдержки отправляются на обработку составами гидрофобизаторов или на процедуру формирования декоративной поверхности (шлифовку, полировку, травление и т.д.), после чего идут на склад готовой продукции.

## **6.2. Техничко-экономическая эффективность внедрения архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов**

В отечественной практике производства бетона и изделий из него в подавляющем большинстве выпускаются бетоны марок М150-М500, при этом доля выпуска высокопрочных самоуплотняющихся бетонов ничтожно мала. Считается, что на практике для производства бетонов марок М800-М1000 и выше необходимо вводить в их состав реакционно-активный микрокремнезем или другие аморфные нанокремнеземы (белая сажа, *silica fumes*, аэросил и др.), при этом расходы цемента с использованием СП и ГП, как правило, должны быть не ниже 500-700 кг/м<sup>3</sup>.

В ходе выполнения диссертационной работы мы подтвердили возможность создания самоуплотняющихся бетонных смесей с добавлением большого количества дробленого песка фр. 0,63-2,5 (5,0) мм без использования дорогостоящих микрокремнеземов и наномодификаторов, с расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup> вместо 700 кг/м<sup>3</sup>. Прочность на сжатие таких бетонов достигает более 100 МПа при расходе цемента 400 кг/м<sup>3</sup>. Задача создания архитектурно-декоративных окрашенных бетонов решается путем введения пигментов или красителей необходимого оттенка цвета и формированием декоративной поверхности, что придает неповторимый облик изделиям из бетона. При этом удельный расход цемента на единицу прочности составляет всего 3,47 кг/МПа. Это позволяет классифицировать разработанные бетоны как высокоэффективные экономичные бетоны нового поколения.

Чтобы оценить экономический эффект от снижения стоимости компонентов при различных расходах на 1 м<sup>3</sup>, мы представляем сравнительную оценку их стоимости в порошково-активированных песчаных

бетонах с расходами цемента 700 кг/м<sup>3</sup> и 400 кг/м<sup>3</sup> (табл. 6.1). В данном случае мы рассматривали бетоны на фракционированных наполнителях и заполнителях на основе отсевов дробления известняка. Выбор в пользу этой горной породы был сделан, исходя из наличия месторождений известняка во многих регионах России, в частности на территории Приволжского федерального округа. Стоимость каменной муки и песков фр.0,16-0,63 мм в приведенной таблице весьма условна и взята, исходя из приблизительных расчетов себестоимости производства этих наполнителей с учетом доставки железнодорожным транспортом на расстояние более 500 км. Понятно, что экономическая эффективность бетонов нового поколения в регионах с наличием карьеров нерудных ископаемых будет существенно выше, чем в регионах с отсутствием таких месторождений.

Таблица 6.1

Сравнительная стоимость компонентов бетонных смесей порошково-активированных песчаных бетонов с ГП Melflux с различным содержанием их в 1 м<sup>3</sup> бетона

Компоненты бетонных смесей	Стоимость единицы, руб./т	Составы бетонных смесей на 1 м <sup>3</sup> для ПАПБ с расходами цемента 700 кг/м <sup>3</sup> и 400 кг/м <sup>3</sup> и их стоимость, руб./м <sup>3</sup>			
		Бетон ПАПБ-5 (700 кг/м <sup>3</sup> )		Бетон ПАПБ-24 (400 кг/м <sup>3</sup> )	
		Расходы компонентов, кг/м <sup>3</sup>	Стоимость компонентов, руб	Расходы компонентов, кг/м <sup>3</sup>	Стоимость компонентов, руб
Цемент белый Египетский 52,5 СЕМ	9000	700	6300	400	3500
Известняк молотый (Пм), плотный, дробимостью Д1000	1200	300	360	350	420
Песок тонкозернистый известняковый, фр.0,16-0,63 мм	500	700	350	620	310
Песок-заполнитель известняковый, фр. 0,63-2,5 (5,0) мм	500	470	235	1040	520
Гиперпластификатор Melflux 5581, 1% от Цемента на сухое вещество	500000	7	3500	4	2000
Вода	30	200	6	163	5
Масса компонентов бетонной смеси на 1 м <sup>3</sup>	–	2377	–	2577	–
Стоимость компонентов бетонной смеси на 1 м <sup>3</sup>	–	–	<b>10751</b>	–	<b>6855</b>
<b>Экономический эффект от снижения стоимости компонентов бетонных смесей, руб./м<sup>3</sup></b>				<b>3896</b>	

В данном случае мы не ставили задачу точной калькуляции себестоимости производства 1 м<sup>3</sup> порошково-активированного песчаного бетона в конкретном регионе. Значительно важнее на этом этапе исследований было показать экономический эффект от снижения расхода цемента и изменения известняковых наполнителей и заполнителей в 1 м<sup>3</sup> при сохранении или незначительном понижении эксплуатационных и физико-технических характеристик порошково-активированного песчаного бетона.

Как видно из анализа табличных данных, экономический эффект от снижения стоимости компонентов порошково-активированных песчаных бетонов с расходами цемента 700 кг/м<sup>3</sup> и 400 кг/м<sup>3</sup> составляет 36%. При этом стоимость компонентов 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси достаточно низкая по сравнению с аналогичной стоимостью бетонов с близкими физико-техническими и эксплуатационными характеристиками. И это с учетом того, что стоимость компонентов оценивалась на составах архитектурно-декоративных бетонов, в которых от 80% до 90% стоимости формируют зарубежные дорогостоящие компоненты: белый цемент и ГП Melflux 5581. При отсутствии необходимости создания светлого цвета бетонных изделий и конструкций или изделий, имеющих яркий насыщенный цвет, можно значительно снизить стоимость компонентов 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси за счет замены белого цемента на серый портландцемент. Так, при замене белого цемента на серый и замене пластификатора Melflux на отечественный Хидетал γ9 стоимость компонентов 1 м<sup>3</sup> самоуплотняющихся бетонов с расходом цемента 700 кг/м<sup>3</sup> снизится в 2,66 раза, а для бетона с расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup> – в 2,26 раза. Для архитектурно-декоративных бетонов высокая стоимость одного кубического метра не является показательной, учитывая малую толщину декоративно-отделочных панелей. Так, если декоративно-отделочные панели имеют толщину 20 мм, а себестоимость изготовления 1 м<sup>3</sup> бетона готовых изделий будет в 2-2,5 раза больше, чем стоимость сырьевых материалов, то 1 м<sup>2</sup> отделочной панели будет стоить 430-615 рублей. Японские производители оценивают стоимость одного квадратного метра декоративной панели из высокопрочного бетона в 1300-2600 рублей.

Таким образом, в результате исследований были получены экономичные высокофункциональные долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород. Учитывая то, что эти бетоны являются самоуплотняющимися (СУБ), можно говорить об экологичности и снижении энергопотребления при переходе на технологию производства таких бетонов. В работе [169] представлена сравнительная оценка затрат энергии при изготовлении изделий из вибрируемого и самоуплотняющегося бетона. Показано, что при изготовлении СУБ затраты энергии уменьшаются в 1,6 раза. Поэтому технологию изготовления изделий из СУБ автор показывает энергосберегающей.

Таким образом, массовое применение высокоэффективных порошково-активированных песчаных бетонов нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности формирует предпосылки внедрения в полный производственный комплекс ресурсосберегающих, энергосберегающих и более экологически чистых технологий. Это обеспечивается сокращением выбросов вредных газов в атмосферу; уменьшением расходов энергии и топлива для транспортировки материалов, на их добычу, дробление и помол; уменьшением объемов добычи нерудных полезных ископаемых и сырья для производства цемента; сокращением наращивания чрезвычайно материалоемкого и энергоемкого производства портландцемента; снижением объемов транспортировки компонентов и, как следствие, сокращение затрат логистических систем перевозок сырья; сокращением энергоемкости производства и заменой дорогостоящих привозных заполнителей более дешевыми местными песками или отходами камнедробления, в том числе из местных известняков, доломитов, гравийно-песчаных смесей.

## **Выводы по 6 главе**

1. Предложены технологические схемы получения фракционированных заполнителей и наполнителей из отходов камнедробления различных горных

пород и производства на их основе самоуплотняющихся архитектурно-декоративных порошково-активированных тонкозернистых бетонов.

2. Показана экономическая эффективность производства архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов от снижения стоимости компонентов при различных расходах их в 1 м<sup>3</sup>, а также эффективность использования в качестве заполнителей и наполнителей различного размерного уровня отсевов камнедробления различных горных пород, в том числе известняков, что значительно расширит сырьевую базу для производства бетонов нового поколения и существенно снизит нагрузку на экосистему регионов с горнодобывающими или горнообогатительными предприятиями.

3. Результаты исследований получили внедрение в ООО «Инновационные технологии» (г. Пенза).

## 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 миллиметрических частиц песка-заполнителя из отходов камнедробления горных пород с прочностью бетона на сжатие 115-144 МПа, с расходом цемента 400-730 кг/м<sup>3</sup>, удельным расходом цемента на единицу прочности 3,5-6,4 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 миллиметрического размерного уровня фракции 0,16-0,63. В сверхвысокопрочных бетонах с расходом цемента 700-730 кг/м<sup>3</sup> содержание каменной муки составляло 40% от массы цемента, а содержание тонкого песка – 100% от массы цемента; в высокопрочных бетонах с расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup> содержание каменной муки достигало 87%, а содержание тонкого песка – 155%.

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

4. Установлены кинетические закономерности ускоренного твердения разработанных архитектурно-декоративных бетонов при температуре  $20 \pm 2$  °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 – 0,8-1,5%, усадочные деформации – 0,3-0,5 мм/м) не исключают применения их при дисперсном или стержневом армировании и в качестве конструкционных. 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 рентгено-фазового 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°С) 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  $1 \text{ м}^3$ , в частности при снижении расхода дорогостоящего белого цемента с  $700 \text{ кг/м}^3$  до  $400 \text{ кг/м}^3$  и увеличении доли песка-заполнителя фр. 0,63-2,5 мм с  $470 \text{ кг/м}^3$  до  $1040 \text{ кг/м}^3$ , 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 самоуплотняющихся архитектурно-декоративных порошково-



активированных песчаных бетонов с использованием отходов камнедробления горных пород в 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» в ООО «Инновационные технологии» (г. Пенза).

### **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 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 использования их для изготовления высокофункциональных песчаных бетонов нового поколения.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Burg R.G., Ost B.W. Engineering properties of commercially available high-strength concretes // Portland cement association. Bulletin RDYD 4 TS. – 1992. – № 1914. – Pp. 56.
- 2) Калашников, В.И. Порошково-активированные тонкозернистые сухие бетонные смеси для производства различных бетонов / В.И. Калашников, В.М. Володин. // Молодежный инновационный форум. УлГТУ. – Май 2011 – С. 67-70.
- 3) Буткевич, Г.Р. Проблемы вовлечения отходов горнодобывающей производства в хозяйственную деятельность // Строительные материалы – 2013. – № 7. – С. 62-65.
- 4) Малышев, Ю.Н. Развитие горно-промышленного комплекса в условиях обострения конкуренции на мировых рынках минеральных ресурсов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2013. – №1
- 5) Буткевич, Г.Р. Периодизация развития промышленности нерудных строительных материалов: оценка пройденного пути и взгляд в будущее // Строительные материалы – 2013. – №1. – С. 16-19.
- 6) Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов // Технологии бетонов. 2007. – № 5. – С. 8-10; 2007. – №6. – С. 8-11; 2008. – №1. – С. 22-26.
- 7) Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы. – 2011. – №3. – С.103-106.
- 8) Гуляева, Е.В. Реотехнологические характеристики пластифицированных цементно-минеральных дисперсных суспензий и бетонных смесей для производства эффективных бетонов. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Гуляева Екатерина Владимировна – г. Пенза, 2012. –178 с.
- 9) Мировая премьера в Австрии – арочный разводной мост из высокопрочного фибробетона // СРІ. Международное бетонное производство. 2011. – № 1. – с. 132-134

- 10) Калашников, В.И. Бетоны старого и нового поколений. Состояние и перспективы // Наука: 21 век. – 2012. – №1. – С 60-67
- 11) <http://www.sistrom.ru/>
- 12) BetonMarketing Deutschland, 40699, Erkrath, Germany. Цветы из бетона // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №5. – С.24-26.
- 13) Хольберг Ресснер, Ed. Zuedlin AG, Новые возможности в области дизайна архитектурных фасадов // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №6. – С.152-155.
- 14) Соня Даллигер, Йоханн Коллегер, Процесс производства оболочек из плоскосборных железобетонных элементов // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №1. – С.104-108.
- 15) Шиппер, Р. Применение СУБ и текстильного армирования // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №5. – С.142-147.
- 16) <http://www.newshouse.ru/page-id-354.html>
- 17) Dyckerhoff Ag, 65203 Wisbaden, Deutschland. Бетонные поверхности с фотокаталитической активацией // CPI Международное бетонное производство – 2013. – №6. – С.18.
- 18) Лаура Гонсалес Микел, Pavimentos de Tudela. Новая бетонная брусчатка с очищающими свойствами // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №6. – С. 152-155.
- 19) Новые возможности для дизайна за счет использования запатентованного во всем мире гранулированного стекла // Бетонный завод. – 2009. – №2. – С. 54.
- 20) Ананьев, С.В. Состав топологическая структура и реотехнологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 – г. Пенза. – 2011. – 148 с.
- 21) Пономарев, А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // Строительные материалы. – 2007. – №5. – С. 2-4.
- 22) Калашников, В.И. Бетоны: макро-, нано- и пикомасштабные сырьевые

компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов // Дни современного бетона. От теории к практике – Запорожье. – 2012. – С. 38-50.

23) Калашников, В.И. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В.И. Калашников, С.В. Ананьев, Ю.С. Кузнецов, В.Л. Хвастунов, М.Н. Мороз // Вестник отделения строительных наук. – 2010. – № 14. Том 2. – С. 27-32.

24) Калашников, С.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. на тему: Тонкозернистые реакционно-порошковые дисперсно-армированные бетоны с использованием горных пород. – Пенза. – 2006. – 163 с.

25) Володин, В.М. Порошково-активированный высокопрочный песчаный бетон и фибробетон с низким удельным расходом цемента на единицу прочности. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Володин Владимир Михайлович. – г. Пенза. – 2012. – 160 с.

26) Янковский, Л.В. Оценка и прогноз состояния цементобетонов, эксплуатирующихся в условиях климата северных территорий // Строительные материалы. – 2012. – №10. – С. 4-6.

27) Янковский, Л.В. Долговечность цементных бетонов в свете перехода на европейские стандарты // Строительные материалы. – 2012. – №1. – С. 16-18.

28) Мороз, М.Н. Высокогидрофобные минеральношлаковые композиционные материалы. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Мороз Марина Николаевна – г. Пенза. – 2007. – 198 с.

29) EN 12878 «Pigmente zum Einfarben von zement und/oder kalkgebundenen Baustoffen.»

30) Lanxess Deutschland GmbH, 46829 Крефельд, Германия. 85-летний опыт применения неорганических пигментов в строительной отрасли // СРІ Международное бетонное производство. – 2011. – №3. – С. 24-27.

31) Лейдерман, Л.П. Особенности свойств цементов с железистоокисными пигментами / Л.П. Лейдерман, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Вестник Южно-

Уральского государственного университета, серия Строительство и архитектура. – 2001. – №5(05). – С. 17-20.

32) Лейдерман, Л.П. Свойства декоративных бетонов с использованием железистоокисных пигментов челябинского завода ЖБИ №1. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / – г. Челябинск, 2001.

33) Хозин, В.Г. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов / В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // Строительные материалы. – 2015. – №2. – С. 25-33.

34) Домокеев, А.Г. Влияние пигментов на некоторые свойства цветных бетонов для полов / А.Г. Домокеев, О.М. Иванов, В.А. Чевений и др. – изд.-во Ростовского ун-та, 1966.-18с.

35) Dr. Peter Weber, Horold Scholz & Co. GmbH. Окрашивание бетона пигментами на основе оксидов металла // CPI Международное бетонное производство. – 2011. – №4. – С.68-70.

36) Клаудиа Эль Ахвани. Что надо учитывать при окрашивании облицовочного бетона // Бетонный завод 2013. – №4. – С.26-27

37) Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества– М.: СИ. – 1986. – 464с.

38) Марко, Л. Сырье для декоративных бетонов. – М.: СИ, 1983. – 159с

39) Петер Билгери, Дортмунд. Выцветание бетонных изделий // CPI Международное бетонное производство. – 2011. – №4. – С. 72-77.

40) Dr. Peter Weber Opus C 6/2007; ad-media-Verlag, 74 ff

41) Bauberatung Zement; Zement-Merkblatt Betontechnik В 27 12.2003: Ausbluhungen - Entstehung, Vermeidung, Beseitigung

42) Уве Фосс, Карл. Выцветы на поверхности бетонных изделий – причины и факторы влияния. Часть 1 // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №5. – С. 88-98.

- 43) Уве Фосс, Карл. Выцветы на поверхности бетонных изделий – причины и факторы влияния. Часть 2 // СРІ Международное бетонное производство.– 2013. – №6. – С.76-80.
- 44) Dr. P.Kresse, «Ausbluhungen – Entstehungmechanismus und ihrer Verhinderung» in Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 3, 1987, S. 160 ff.
- 45) Dr. P.Kresse, «Einsatz von Farbe in Beton. Erosion und Bewuchs von Betonober – flachen bei der Bewitterung» in Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 11, 1990, S. 50 ff.
- 46) Dr. P.Kresse, «Bewitterung von beschichteten Betondachsteinen» in Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 7, 1994, S. 83 ff.
- 47) Хурех Chemical Corporation, Ричмонд , Британская Колумбия, Канада. Самовосстанавливающиеся свойства кристаллической гидроизоляции: идеальное решение для эксплуатации в морской среде// СРІ Международное бетонное производство. – 2013. – №5. – С.50-52
- 48) Попкова, А.М. Конструкции зданий и сооружений из высокопрочного бетона // Серия строительных конструкций // Обзорная информация. Вып. 5. М.: ВНИИТПИ Госстроя СССР. – 1990. – 77с.
- 49) Мещерин, В. Добавки и дополнительные компоненты в современной технологии производства / В. Мещерин, М. Катц // СРІ Международное бетонное производство. – 2011. – №11. – С.14-21.
- 50) Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев и др. // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70-75.
- 51) Буткевич, Г.Р. Развитие промышленности нерудных строительных материалов России и США. Прошлое и перспективы // Строительные материалы. – 2013. – №10. – С. 4-9.
- 52) Баженов, Ю.М., Наноматериалы и нанотехнологии современной технологии бетонов / Ю.М. Баженов, В.Р. Фалкиман, Б.И. Булгаков //Вестник МГСУ. – 2012. – №12. – С. 125-133.

- 53) Баженов, Ю.М. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2009. – №6. – С. 66-67.
- 54) Королев, Е.В. – Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // Строительные материалы. – 2013. – №6. – С. 60-64.
- 55) Фаликман, В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве строительных материалов // Строительные материалы. – 2013. – №9. – С. 77-81.
- 56) Гордина, А.Ф. Водостойкие гипсовые материалы, модифицированные цементом, микрокремнеземом и наноструктурами // Строительные материалы. – 2014. – №6. – С. 35-37.
- 57) Королев, Е.В. Оценка концентрации первичных наноматериалов для модифицирования строительных материалов // Строительные материалы. – 2014. – №6. – С. 31-34.
- 58) Урханова, Л.А., Модифицированный бетон с нанодисперсными добавками / Л.А. Урханова, С.А. Хасарнов, С.П. Бардахамов // Строительные материалы. – 2014. – №8. – С. 52-55.
- 59) Nanops Nano Polymer Solutions, 8500, Kortrijk, Belgien. Нанотехнологии для строительной промышленности // CPI Международное бетонное производство. – 2014. – №2. – С.50.
- 60) Nanops Nano Polymer Solutions, 8500, Kortrijk, Бельгия. Нанотехнологии для бетонной промышленности // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №4. – С.64-65.
- 61) Reckli GmbH, 44268, Херне, Германия – Визуализация фото и графики на бетонной поверхности // CPI Международное бетонное производство. – 2014. – №3. – С.173
- 62) Lucem GmbH, 52222, Германия. Фасад в Берлине – удивительная игра светотеней при помощи светопрозрачного бетона // CPI Международное бетонное производство. – 2014. – №4. – С.36-37.

- 63) Арнольд Ван Акер. Особенности производства архитектурных бетонных фасадов // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №11. – С.130-138.
- 64) Томас Джул Андерсон. Бетонная конструкция по индивидуальному заказу с применением цифровых методов производства // CPI Международное бетонное производство. – 2014. – №3. – С.20-26.
- 65) Verhaegh. R.W.A 2010 – «Free Forms in concrete», Eindhoven Universiti of Technology, 2010, p.8
- 66) Andersen T.J., Greisen J.R. and Thrane L.N. Tailormade concrete structures: Architectural opportunities in robot fabricated concrete form-wok, Facade Techtonics Journal, Number 8: Februare 2013, Conference Proceedings, California, USA – 2013 – P. 18-22.
- 67) Redi-Rock international, Шарлевуа, штат Мичиган, 49720, США – Эстетическое решение для подпорных стенок// CPI Международное бетонное производство. – 2014. – №1. – С.96-97
- 68) KBH Baustoffwerke Gebhart and Suhne Gmbh and Go.Kg, 87760 Лакен, Германия. Революционная автоматическая установка для состаривания расколотых болоков и камней // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №2. – С. 144-146.
- 69) Vertex Hydra S.r.l., 44034 Фоссалта (FE), Италия. Экструдированная цементно-песчаная черепица с полимерной фиброй // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №2. – С.147.
- 70) Марк Кюпперс, CPI worldwide, Карлсруэ, Германия. Инновационная продукция для большей свободы// CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №3. – С.74-83.
- 71) Демьянова, В.С. Экологические и технико-экономические аспекты использования отходов нерудной промышленности в производстве цемента / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, Г.Н. Казина, С.М. Саденко // Строительные материалы. – 2006. – №11. – С. 52-53.



- 72) Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.
- 73) Гридчин, А.М. Строительные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях / А.М. Гридчин, Ю.М. Баженов, В.С. Лесовик и др. // учебное пособие. – М.: изд-во АСВ; Белгород: из-во БГТУ. – 2008. – 595с.
- 74) Белякова, Е.А. Порошковые и порошково-активированные бетоны с использованием горных пород и зол ТЭЦ. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Белякова Елена Александровна – г. Пенза, 2013. –199 с.
- 75) Ханс Бойсгаузен, Кейптаунский университет, ЮАР. Минимизация содержания вяжущего для повышения долговечности// СРІ Международное бетонное производство. – 2014. – №5. – С.34-38.
- 76) Wasserman, R. Katz, A. Bentur, A. Minimum Cement Content Requirements: a must or a myth Materials and Structures. – 2009. – 42 (7). – P. 973-982.
- 77) Kolios, S. Georgiu, C. 2005. The effect of paste volume and of water content on the Strength and water absorption of concrete Cement and Concrete Composites.27. – P. 211-216.
- 78) Fowler D., Koehler E., Rached M. Use of Aggregates to Reduce Cement Content in Concrete. Second International Conference on Sustainable Constructions Materiales and Technologies. Universitat Politecnica delle Marche, Ancona, Italy – 2010.
- 79) Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Гузеев Е.А. // М.: Стройиздат. – 1980. – 536 с.
- 80) KVM International A/S, 8620 Kjellerup, Дания. Высолы: как этого избежать? // СРІ Международное бетонное производство. – 2014. – №5.– С.100.
- 81) Лукинский, О.А. Гидрофобизация зданий // Жилищное строительство. – 2008. – №11 – С.24-25.
- 82) Войтович, В.А. Гидрофобизация как способ повышения срока службы зданий / В.А. Войтович, И.Н. Хряпченкова, А.А. Яворский // Строительные материалы. – 2013. – №12. – С.15-17.

- 83) Brameshuber W., Schubert P. Neue Entwicklungen bei Beton und Mauerwerk.// Öster. Ingenieur-und Architekten-Zeitschrift., – S. 199-220.
- 84) Grube P., Lemmer C., Rühl M. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton. – P. 243-249.
- 85) Kleingelhöfer P. Neue Betonverflüssiger auf Basis Polycarboxilat.// Proc. 13. Jbasil Weimar 1997, Bd. 1, P. 491-495.
- 86) Schmidt M., Fenling E., Teichmann T., Bunjek K., Bornemann R. Ultrahochfester Beton: Perspective für die Betonfertigteile-Industry.// Betonwerk+Fertigteile-Technik. – 2003. – № 39. – P. 16-29.
- 87) Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimierung der Mischung sowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungsbetone.// Betonwerk+Fertigteile-Technik. – 2003. – № 3. – S. 30-38.
- 88) Bornemann R., Fenling E. Ultrahochfester Beton-Entwicklung und Verhalten.// Leipziger Massivbauseminar. – 2000. – Bd. 10. – S. 1-15.
- 89) Schmidt M. Bornemann R. Möglichkeiten und Grenzen von Hochfestem Beton.// Proc. 14, Jbausil. – 2000. – Bd. 1. – S. 1083-1091.
- 90) Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe.// Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schiesse. Heft 2. – 2003. – S. 189-198.
- 91) Dallaire E., Bonneau O., Lachemi M., Aït-Sin P.-C. Mechanical Behavior of Consolidated Reactive Powder Concrete.// American Society of Civil Engineers Materials Engineering Conference. Washington. DC. – November 1996. – Vol. 1. – pp. 555-563.
- 92) Richard P., Cheurezy M. Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bougies.// Cement and Concrete Research. – Vol. 25. No. 7. – 1995. – pp. 1501-1511
- 93) Richard P., Cheurezy M. Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength. // ACI SP 144-22. – 1994. – pp. 507-518.
- 94) Berg W., Suberte F., Härdtl R., Wiens U. Flugzeuge im Betonbau-Vom Abfall zum Bauprodukt Auch eine schiessl-Erfolgsstory.// Centrum Baustoffe und

Materialsprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. Fest schrift zum 60. Geburstag von Prof.-Dr. Ing. Peter Schliessl. Heft 2. – 2003. – S. 189-198.

95) Müller C., Sehröder P. Schliße P., Hochleistungsbeton mit Steinkohlenflugasche. Essen VGB Fechnische Vereinigung Bundesverband Kraftwerksneleprodukte.// E.V., 1998-Jn: Flugasche in Beton, VGB/BVK-Faschaugung. – 01 Dezember 1998. – Vortag 4, 25 seiten.

96) Stark J., Wicht B. Geschichtleiche Entwiclung der ihr Beitzag zur Entwiclung der Betobbauweise.// Öster. Ingenieur-und Architekten-Zeitsehrift. – 142. – 1997. Н.9.

97) Калашников, В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов.// Диссертация в форме научного доклада на соискание степени доктора технических наук, Воронеж. – 1996. – 89 с.

98) Калашников, В.И. О структурно-реологическом состоянии предельно разжиженных высококонцентрированных дисперсных систем / В.И. Калашников, И.А. Иванов // Труды IV Национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов. БАН, София. – 1985. – С. 127-130.

99) Иванов, И.А. К методике оценки влияния пластифицирующих добавок на технологические реологические свойства цементных композиций. / И.А. Иванов, В.И. Калашников, Ю.С. Кузнецов, В.Н. Шкурко // Реология бетонных смесей и её технологические задачи Тез. доклад III Всесоюзного симпозиума, Рига.: РПИ. – 1979. – С. 179-182.

100) Иванов, И.А. Эффективность пластифицирования минеральных дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твёрдой фазы. / И.А. Иванов, В.И. Калашников // Реология бетонных смесей и её технологические задачи. Тез. доклад III Всесоюзного симпозиума, Рига. РПИ. – 1979. – С. 35-38.

101) Калашников, В.И. О характере пластифицирования минеральных дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твёрдой фазы. / В.И. Калашников, И.А. Иванов // Механика и технология композиционных

материалов. Материалы II Национальной конференции, София: БАН. – 1979. – С. 455-458.

102) Калашников, В.И. О реакции различных минеральных композиций на нафталин-сульфокислотные суперпластификаторы и влияние на нее быстрорастворимых щелочей. // Механика и технология композиционных материалов. Материалы III Национальной конференции с участием зарубежных представителей. София. БАН. – 1982.

103) Калашников, В.И. Регулирование разжижающего эффекта суперпластификаторов исходя из ионноэлектростатического действия. // Производство и приложение на химические добавки в строительстве. Сборник тезисов НТК. София. – 1984. – С. 96-98.

104) Калашников, В.И. Особенности реологических изменений цементных композиций под действием ионностабилизирующих пластификаторов. / В.И. Калашников, И.А. Иванов // Сборник трудов "Технологическая механика бетона" Рига РПИ. – 1984. – С. 103-118.

105) Калашников, В.И. О преимущественной роли ионноэлектростатического механизма в разжижении минеральных дисперсных композиций. // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Тез. V Республиканской конференции. Таллин. – 1984. – С. 68-71.

106) Калашников, В.И. Регулирование разжижающего эффекта суперпластификаторов исходя из ионноэлектростатического действия. // Производство и приложение на химические добавки в строительстве. Сборник тезисов НТК. София. – 1984. – С. 96-98.

107) Калашников, В.И. Управление реологией дисперсных систем с суперпластификаторами изменением ионного состава жидкой фазы / В.И. Калашников, Н.Б. Урьев // Реология бетонных смесей и её технологические задачи. Тез. докл. V Всесоюзного симпозиума, 4 I Рига. РПИ. – 1980. – С. 92-93.

108) Калашников, В.И. Приоритетные направления в технологии бетонов / В.И. Калашников, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, М.Н. Мороз, Р.А. Ибрагимов // Сборник статей Международной научно-технической конференции

«Композиционные строительные материалы. Теория и практика». – Пенза: ПДЗ. – 2013. – С. 34-38.

109) Калашников, В.И. Обеспечение оптимальной топологии самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов / В.И. Калашников, С.В. Ананьев, В.П. Архипов, М.Н. Мороз, В.М. Володин, Д.М. Валиев // Международная научно-технической конференция «Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов». Издательство Пензенского ГУАС. – Пенза. – 2009. – С. 46-51.

110) Долгополов, Н.Н., Новый тип цемента: структура цементного камня. / Н.Н. Долгополов, М.А. Суханов, С.Н. Ефимов // Строительные материалы. – 1994. – №1. – С. 5-6.

111) Хозин., В.Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности – зеленая альтернатива цементной индустрии России / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, И.Р. Сибгатуллин, и др. // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 76-83.

112) Мороз, М.Н. Морозостойкость гидрофобизированных бетонов. / М.Н. Мороз, В.И. Калашников, А.В. Петухов // Молодой ученый. – 2014. – №19. – С. 222-225.

113) Schnachinger J, Schuberrt J, Stengel T, Schmidt K, Heinz D, Ultrahochfester Beton – Bereit Für die Anwendung? Schriftenreihe Baustoffe. Fest – schrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-ing. Peter Schliessl. Heft 2. – 2003. – С. 267-276.

114) Калашников, В.И. Проблемы использования высокопрочного и особовысокопрочного бетона и основные принципы их создания. // Технологии бетонов. – 2009. – №2. – С.8-10.

115) Aitchin P.-C., Neville A. High-Performance Concrete Demystified. Concr. Intern. 1993, vol. 15, № 1, p. 21 – 26.

116) Edward G., Nawy P. Fundamentals of High Performance Concrete. Sec. ed., Willy. 2001. — 302 p.

117) Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Госстройиздат. – 1961. – 162 с.

- 118) Михайлов, В.В. Бетон и железобетонные конструкции. / В.В. Михайлов, Ю.С. Волков // Состояние и перспективы применения в промышленном и гражданском строительстве – М. Стройиздат. – 1983. – 358 с.
- 119) Михайлов, В.В. Перспективы применения конструкций из высокопрочных бетонов / В.В. Михайлов, В.А. Беликов // Бетон и железобетон. – 1982. – №5. – С. 7–8.
- 120) Михайлов, К.В. К 150-летию изобретения железобетона / К.В. Михайлов, Г.К. Хайдуков // Бетон и железобетон. – 1999. – №5. – С. 2–5.
- 121) Михайлов, К.В. Бетон и железобетон – основа современного строительства / К.В. Михайлов, Г.И. Бердичевский, Ю.А. Рогатин // Бетон и железобетон. – 1990. – №2. – С. 3–4.
- 122) Михайлов, К.В. Взгляд на будущее бетона и железобетона / Михайлов К.В. // Бетон и железобетон. – 1995. – №6. – С. 2–5.
- 123) Гончарова Л.С. Бетон и железобетон – 1972. – №2. – С.36-37.
- 124) Каприелов, С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях / С.С.Каприелов, В.И.Травуш, Н.И.Карпенко, А.В.Шейнфельд, Г.С.Кардумян, Ю.А.Киселева, О.В. Пригоженко //Строительные материалы. – 2008. – №3. – С. 9-13.
- 125) Coleparđi, M. Практическое применение СУБ в европейских строительных проектах / Coleparđi M., S Colleparđi, R Troli, Enco // CPI Международное бетонное производство. – 2007. – №7. – С. 42-48.
- 126) Соломатов, В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости./ В.И. Соломатов, В.Н. Выровой и др // Киев, Будивельник. – 1991.– 144 с.
- 127) Аганин, С.П. Бетоны низкой водопотребности с модифицированным кварцевым наполнителем // Автореферат на соискание уч. степени кандидата технических наук, М. – 1996. – 17 с.
- 128) Фадель, И.М. Интенсивная раздельная технология бетона, наполненного базальтом. // Автореферат канд .диссертации, М:.. – 1993. – 22 с.

- 129) Specifying constituent materials for concrete to BS EN 206-1/BS 8500: Admixtures 45.310. First published 2000 IBN 0 7210 1568 9/ Price group A. British Cement Association 2000.
- 130) Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. – Москва. – 2000.
- 131) ГОСТ 24211-2003. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические требования.
- 132) Кунцевич, О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – Л.: Стройиздат. – 1983. – 131 с.
- 133) Москвин, В.М. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой ГКЖ-94 / В.М. Москвин, Батраков В.Г., Кунцевич О.В. и др. // Бетон и железобетон. – 1980. – №7. – С. 20-22.
- 134) Кунцевич, О.В. Влияние газообразующей добавки ГКЖ-94 и воздухововлекающей добавки СНВ на морозостойкость бетонов / О.В. Кунцевич, П.Е. Александров // Бетон и железобетон. – 1964. – №2. – С. 70-72.
- 135) Калашников, В.И. Модификация глиношлаковых композиций с полимерными добавками и гидрофобизаторами с целью повышения водостойкости / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров и др. // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. научных трудов МНТК. – Пенза: ПДЗ. – 2002. – С. 150-152.
- 136) Мороз, М.Н. Предполагаемый механизм поверхностной гидрофобизации строительных материалов / М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев, В.И. Калашников // Молодой ученый. 2014. – №11(70) Ч. 1. – С. 80-83.
- 137) Бажант, В. Силиконы. Кремнийорганические соединения, их получение, свойства и применение/ В. Бажант, И. Хваловски, И. Ратоуски. // – М.: Госхимиздат – 1960. – С. 712.
- 138) Калашников, В.И. Облегченные трехслойные крупноформатные стеновые блоки из высокопрочного реакционно-порошкового бетона нового поколения. / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Суздальцев и др. // 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. С. 41-44.

139) Калашников, В.И. Бетоны нового поколения и реологические матрицы / В.И. Калашников, С.В., Ананьев С.В. // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов. – Пенза. – 2011. – С. 25-41.

140) Kalaschnikov, V. Povder activation of concrete Valution criteria and its effectiveness // V Ukraino-Polskie Chmelnicki-Jaremzcze. Interdisciplinary Integration of Science in Technology, education and Economy. The reports edited by Shalapko J. And Zolotovski B. – 2013 – 646p. – P. 151-158.

141) Авксентьев, В.И. Применение отходов промышленности в самоуплотняющихся бетонах / В.И. Авксентьев, Н.Э. Гайфуллин, Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе регионов. – 2013. – №3. – С. 65-69.

142) Хигерович, М.И. Синтетические жирные кислоты как добавки к цементным системам / М.И. Хигерович, Г.Г. Зуйков // Сборник докладов МИСИ Улучшение свойств бетона. – 1964.

143) Патент Австрии №221410, класс 80 в, 1962.

144) Калашников, В.И. Высокогидрофобные строительные материалы на минеральных вяжущих / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, В.А. Худяков, П.Г. Василик // Строительные материалы. – 2009. – №6. – С. 81-83.

145) Андреева, А.Б. Пластифицирующие и гидрофобизирующие добавки в бетонах и растворах: Учеб. Пособие для СПТУ. – М.: Высш.шк. – 1988. – 55 с.

146) Пащенко, А.А. Кремнийорганические защитные покрытия / А.А. Пащенко, М.Г. Воронков – Киев: Техніка. – 1969. – 251 с.

147) Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85) / НИИЖБ.-М.: Стройиздат. – 1989. – 39 с.

148) Баженов, Ю.М. Бетонополимеры. – М.: СИ. – 1983. – 472 с.



- 149) Гранау, Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. – М.: СИ. – 1980. – 215 с.
- 150) Вилков, С.И. Исследование процесса высолообразования при гидратации декоративного портландцемента и разработка методики его снижения: автореферат канд. диссертации. – Свердловск. – 1979. – 12 с.
- 151) Волконский, Б.В. Технологические, физико-механические и физико-химические исследования цементных материалов. / Б.В. Волконский, С.Д. Макашов, Н.П. Штейерт // Л.; СИ. – 1972. – 269 с.
- 152) Боженков, П.И. Проблемы полного использования нефелинового (белитового) шлама Ачинского глиноземного комбината / Тезисы докл. и сообщ. к Всесоюз. Координац. Сопещания. – Ачинск. – 1977. – с. 3-6.
- 153) Кузнецова Е.Ф. Эффективные литые бетоны с использованием отходов камнедробления: Автореферат канд. диссертацией. – Москва. – 2014.
- 154) Кузнецова, Е.Ф. Получение эффективных литых бетонных смесей и бетонов на основе наноматериалов и отходов камнеобработки / Е.Ф. Кузнецова, Г.М. Соболев, К.Г. Соболев // вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им.В.Г.Шухова. – 2014. – с. 7-10.
- 155) Махамбетова, К.Н. Сухие строительные смеси для изготовления высокогидрофобных, морозостойких цементных растворов. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Махамбетова Камажай Нуррабулаевна – Пенза – 2008. – 167 с.
- 156) [http://fasad-rus.ru/graficheskii-beton--novyi-new\\_688.html](http://fasad-rus.ru/graficheskii-beton--novyi-new_688.html)
- 157) Калашников, В.И. –Капиллярная усадка высокопрочных реакционно-порошковых бетонов и влияние на нее масштабного фактора // Строительные материалы. – 2010. – № 5. – С.52-53.
- 158) Рекламно-информационный проспект немецкой фирмы «Dyckerhoff Beton GmbH».
- 159) Европейский нормативный документ по самоуплотняющемуся бетону: DAfStb-Richtlinie Selbsverdichte nder Beton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003.

- 160) Hillemeier, B.; Buchenau, G.; Herr, R.; Hüttl, R.; Klüßendorf, St.; Schubert, K.: Spezialbetone, Betonkalender. – 2006.– 1, Ernst & Sohn. – P. 534-549.
- 161) Дворкин, Л.И. Строительные минеральные вяжущие вещества: учебное практическое пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Москва. – 2011. – С. 541.
- 162) Кунцевич, О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – Л.: Стройиздат. – 1983. – 131 с.
- 163) Кунцевич, О.В. Влияние газообразующей добавки ГКЖ-94 и воздухововлекающей добавки СНВ на морозостойкость бетонов / О.В. Кунцевич, П.Е. Александров // Бетон и железобетон. – 1964. – №2. – С. 70-72.
- 164) Иванов, Ф.М. Влияние условий твердения и добавок воздухововлекающих веществ на морозостойкость бетона / Ф.М. Иванов, А.С. Бакланов, В.В. Моисеева // Гидротехническое строительство. – 1963. – №3.
- 165) Москвин, В.М. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре / В.М. Москвин, М.М. Капкин, А.М. Подвальный // Стройиздат. – 1967. – 132 с.
- 166) Презентация нового, не имеющего аналогов бетоносмесителя // СРІ. Международное бетонное производство. – 2013. – № 4. – с. 56-57.
- 167) Мещерин, В. САП: Новая добавка для бетона // СРІ Международное бетонное производство. – 2012. – №2. – С.36-42.
- 168) Mechtcherine V., Reinhardt H.W.(Eds): Application of superabsorbent polymers in concrete construction. RILEM State of the Art Reports 2. Springer 2012
- 169) Де Шуттер, Самоуплотняющийся бетон – путь в будущее // СРІ Международное бетонное производство. – 2013. – №3. – С.40-45.
- 170) Калашников, В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / 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.
- 171) Proc. Rilem Symposium 2007 Int Rilem Symposium on Photocatalysis Environment and Construction Materials. – Firenze. – 2007.

- 172) Фаликман, В.Р., Применение фотокаталитических бетонов и строительных растворов, содержащих наночастицы диоксида титана / В.Р. Фаликман, А.Я. Вайнер // Популярное бетоноведение. – 2009. – №3. – С.42-50.
- 173) Hoffmah M.R. et al.// Chem. Rev. – 1995 – v.95 – P. 69-96.
- 174) Lin Y.-M. et al.// Environ. Sci. Technol. – 2006 – 5. v. 40. – P. 1616-1621.
- 175) Ryu J., Choi W. // Environ. Sci. Technol. – 2004 – 8. v. 77. – P. 1472-1442.
- 176) Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air. – Elsevier. – 1993.
- 177) Nanops Nano Polymers Solutions, Нанотехнологии для строительной промышленности // СРІ Международное бетонное производство. – 2014. – №2. – С.50.
- 178) HeidelbergCement AG, 69120 Heidelberg, Deutschland, Очистка воздуха с помощью бетона // СРІ Международное бетонное производство. – 2008. – №1. – С.62.
- 179) Хела, Р. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа  $TiO_2$  в бетоне / Р. Хела, Л. Бондарова // Строительные материалы. – 2015. – №2. – С. 77-81.
- 180) Даниель Пфэффер Серафим, Использование бетона, армированного стекловолокном в конструкциях с высокими архитектурными требованиями // СРІ Международное бетонное производство. – 2012. – №5. – С.130-134.
- 181) Калашников, В.И. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпосян // Известия вузов. Строительство. – 2014. – №7. – С 11-21.
- 182) Kalaschnikov, V. Development of compositions of self-compacting fine-grained reflectoty concrete / V. Kalaschnikov, P. Kornienko, L. Gorschkova, G. Gakshteter, A. Sarsenbaeva // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2014. – Vol.12, pp. 299-309.

# Приложения

Приложение 1

Таблица 1

Физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов на отсевах дробления гранита с различным содержанием пигмента

Наименование компонентов		На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Π <sub>м</sub> Ц	Π <sub>т</sub> Ц	Π <sub>з</sub> Ц	Прочность МПа, через, сут.		
									1	7	28
ПАПБ-1	Портландцемент Вольский 500 ДО СЕМ 42,5	700	225,8	0,315	ρ <sub>вл</sub> 1 сут.	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =53	R <sub>сж</sub> =97	R <sub>сж</sub> =108
	ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2437						
	Гранит молотый (Π <sub>м</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	107,9	0,101	ρ <sub>теор</sub> 2444	I <sub>Π<sub>т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,22 I <sub>Π<sub>з</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,80			Ц <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> =6,48 кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> =0,15 МПа/кг Ц <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 40,4 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,2		
	Песок тонкий гранитный (Π <sub>т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		K <sub>уп</sub> 0,997	V <sub>вд</sub> = 560,2 C <sub>вд</sub> = 57,1 % V <sub>вдт</sub> = 812 C <sub>вдт</sub> = 82,7% C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 77,4 %					
	Песок крупный гранитный (Π <sub>з</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	Расплав конуса Хегерманна 32 см, расплав K <sub>м</sub> 46,5 см							
	ΣM <sub>сух.</sub>	2177	—								
	ΣV <sub>сух.</sub>	—	759,9								
	Вода	221,1	221,1								
M <sub>б.с.</sub>	2398,1	—									
V <sub>б.с.</sub>	—	981									
ПАПБ-2	Портландцемент Вольский 500 ДО СЕМ 42,5	700	225,8	0,315	ρ <sub>вл</sub> 1 сутки	0,43	1	0,67	R <sub>сж</sub> =50	R <sub>сж</sub> =96	R <sub>сж</sub> = 108
	ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2440						
	Гранит молотый (Π <sub>м</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3700 см <sup>2</sup> /г	300	107,9	0,101	ρ <sub>теор</sub> 2456	I <sub>Π<sub>т</sub></sub> <sup>вд</sup> = 2,24 I <sub>Π<sub>з</sub></sub> <sup>вдт</sup> = 4,83			Ц <sub>R<sub>с</sub></sub> <sup>уд</sup> =6,48кг/МПа; R <sub>ц</sub> <sup>уд</sup> =0,15МПа/кг Ц <sub>R<sub>и</sub></sub> <sup>уд</sup> = 39,3 кг/МПа R <sub>сж</sub> /R <sub>и</sub> = 6,06		
	Песок тонкий гранитный (Π <sub>т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		K <sub>уп</sub> 0,993	V <sub>вд</sub> = 564,3 C <sub>вд</sub> = 57,3 % V <sub>вдт</sub> = 816 C <sub>вдт</sub> = 82,8 % C <sub>тв</sub> <sup>в</sup> = 77,5 %					
	Песок крупный гранитный (Π <sub>з</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	Расплав конуса Хегерманна 31,4 см расплав K <sub>м</sub> 46 см							
	Пигмент черный, 3% от Ц	21	4,07								
	ΣM <sub>сух.</sub>	2198	—								
	ΣV <sub>сух.</sub>	—	763,9								
Вода	221,1	221,1									
M <sub>б.с.</sub>	2419,1	—									
V <sub>б.с.</sub>	—	985									

Продолжение таблицы 1

ПАПБ-3										
Портландцемент Вольский 500 ДО СЕМ 52,5	700	225,8	0,315	$\rho_{вл1}$ сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=50$	$R_{сж}=94$	$R_{сж}=106$
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2445	$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$			$R_{из}=7,9$	$R_{из}=16,7$	$R_{из}=17,2$
Гранит молотый (ПМ), $S_{уд} = 3700 \text{ см}^2/\text{Г}$	300	107,9	0,101	$\rho_{теор}$	$I_{Пт}^{вд} = 2,25$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 6,60 \text{ кг/МПа};$ $R_{ц}^{уд} = 0,15 \text{ МПа/кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 40,7 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 6,16$		
Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		2463	$I_{Пз}^{вдт} = 4,84$					
Песок крупный гранитный (Пз) фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	$K_{уп}$	$V_{вд} = 567$						
Пигмент черный 5% от Ц	35	6,8	0,992	$C_{вд} = 57,4 \%$						
$\Sigma M_{сух.}$	2212	—	Распływ конуса Хегерманна 31,4 см распływ $K_M$ 46 см	$V_{вдт} = 818,8$						
$\Sigma V_{сух.}$	—	766,7		$C_{вдт} = 82,9 \%$						
Вода	221,1	221,1		$C_{тв}^v = 77,6 \%$						
$M_{б.с.}$	2433,1	—								
$V_{б.с.}$	—	987,8								
ПАПБ-4										
Портландцемент Вольский 500 ДО СЕМ 42,5	700	225,8	0,315	$\rho_{вл1}$ сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=46$	$R_{сж}=91$	$R_{сж}=103$
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2446	$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$			$R_{из}=8,1$	$R_{из}=16,5$	$R_{из}=16,7$
Гранит молотый (ПМ), $S_{уд} = 3700 \text{ см}^2/\text{Г}$	300	107,9	0,101	$\rho_{теор}$	$I_{Пт}^{вд} = 2,26$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 6,79$ кг/МПа; $R_{ц}^{уд} = 0,15$ МПа/кг $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 41,9 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 6,16$		
Песок тонкий гранитный (ПТ), фр. 0,16-0,63 мм	700	251,8		2470	$I_{Пз}^{вдт} = 4,86$					
Песок крупный гранитный (Пз), фр. 0,63÷2,5 мм	470	169	$K_{уп}$	$V_{вд} = 569,7$						
Пигмент черный, 7% от Ц	49	9,5	0,99	$C_{вд} = 57,5 \%$						
$\Sigma M_{сух.}$	2226	—	Распływ конуса Хегерманна 31,4 см распływ $K_M$ 46 см	$V_{вдт} = 821,5$						
$\Sigma V_{сух.}$	—	769,4		$C_{вдт} = 82,9 \%$						
Вода	221,1	221,1		$C_{тв}^v = 77,6 \%$						
$M_{б.с.}$	2447,1	—								
$V_{б.с.}$	—	990,5								

Таблица 2

Физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов на отсевах дробления мрамора с различным содержанием  $TiO_2$

Наименование компонентов	На 1 м <sup>3</sup> , кг	Объем на 1 м <sup>3</sup> , л	В/Ц, В/Т	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{П_M}{Ц}$	$\frac{П_T}{Ц}$	$\frac{П_3}{Ц}$	Прочность МПа, через, сут.		
								1	7	28
ПАПБ-5										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,285	$\rho_{вл}$ 1 сут.	0,43	1	0,67	$R_{сж}=66$	$R_{сж}=113$	$R_{сж}=127$
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2496						
Мрамор молотый (П <sub>М</sub> ), $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$	300	103,4	0,091	$\rho_{теор}$ 2534	$I_{П_T}^{вд} = 2,21$ $I_{П_3}^{вдт} = 4,79$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,5 \text{ кг/МПа};$ $R_{ц}^{уд} = 0,18 \text{ МПа/кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 36,6 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 6,65$		
Песок тонкий мраморный (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		$K_{уп}$						
Песок крупный мраморный (П <sub>3</sub> ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	162	Расплав конуса Хегерманна 36 см, расплав $K_M$ 52,5 см	0,985	$C_{вд} = 56,9 \%$	$V_{вдт} = 776$	$C_{вдт} = 82,7\%$	$C_{тв}^v = 78,6 \%$		
$\Sigma M_{сух.}$	2177	—								
$\Sigma V_{сух.}$	—	738								
Вода	200	200								
М <sub>б.с.</sub>	2377	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	938								
ПАПБ-6										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,277	$\rho_{вл}$ 1 сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=66$	$R_{сж}=114$	$R_{сж}=130$
$TiO_2$ 3% от Ц	21	4,9		2527						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4			$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$					
Мрамор молотый (П <sub>М</sub> ), $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$	300	103,4	0,088	$\rho_{теор}$ 2552	$I_{П_T}^{вд} = 2,21$ $I_{П_3}^{вдт} = 4,78$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,38 \text{ кг/МПа};$ $R_{ц}^{уд} = 0,18 \text{ МПа/кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 35,3 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 6,56$		
Песок тонкий мраморный (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		$K_{уп}$						
Песок крупный мраморный (П <sub>3</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	162	Расплав конуса Хегерманна 36,2 см, расплав $K_M$ 52,8 см	0,99	$C_{вд} = 56,9 \%$	$V_{вдт} = 775,3$	$C_{вдт} = 82,7\%$	$C_{тв}^v = 79,2 \%$		
$\Sigma M_{сух.}$	2198	—								
$\Sigma V_{сух.}$	—	742,9								
Вода	194,4	194,4								
М <sub>б.с.</sub>	2392,4	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	937,3								

ПАПБ-7										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,267	$\rho_{в\lambda}$ 1 сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=68$	$R_{сж}=118$	$R_{сж}=136$
TiO <sub>2</sub> 5% от Ц	35	8,2		2533						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4								
Мрамор молотый (П <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /Г	300	103,4	0,084	$\rho_{теор}$	$I_{ПТ}^{ВД} = 2,19$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,14$ кг/МПа;	$R_{ц}^{уд} = 0,19$ МПа/кг	$\Pi_{R_{и}}^{уд} = 34,5$ кг/МПа
Песок тонкий мраморный (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		2570	$I_{ПЗ}^{ВДТ} = 4,76$					
Песок крупный мраморный (П <sub>З</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	162		K <sub>уп</sub>	$V_{вд} = 530$					
				0,985	$C_{вд} = 56,8\%$			$R_{сж}/R_{и} = 6,69$		
			Расплав конуса Хегерманна 31,5 см, Расплав К <sub>М</sub> 46,3 см		$V_{вдт} = 771,4$					
$\Sigma M_{сух.}$	2212	—			$C_{вдт} = 82,6\%$					
$\Sigma V_{сух.}$	—	746,2			$C_{тв}^V = 79,9\%$					
Вода	187,2	187,2								
M <sub>б.с.</sub>	2399,2	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	933,4								
ПАПБ-8										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,265	$\rho_{в\lambda}$ 1 сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=66$	$R_{сж}=115$	$R_{сж}=132$
TiO <sub>2</sub> 7% от Ц	49	11,5		2556						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4								
Мрамор молотый (П <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3800 см <sup>2</sup> /Г	300	103,4	0,083	$\rho_{теор}$	$I_{ПТ}^{ВД} = 2,20$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,3$ кг/МПа;	$R_{ц}^{уд} = 0,19$ МПа/кг	$\Pi_{R_{и}}^{уд} = 35,0$ кг/МПа
Песок тонкий мраморный (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	241,4		2579	$I_{ПЗ}^{ВДТ} = 4,77$					
Песок крупный мраморный (П <sub>З</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	162		K <sub>уп</sub>	$V_{вд} = 531,6$					
				0,991	$C_{вд} = 56,8\%$			$R_{сж}/R_{и} = 6,60$		
			Расплав конуса Хегерманна 32,8 см, Расплав К <sub>М</sub> 50 см		$V_{вдт} = 773$					
$\Sigma M_{сух.}$	2226	—			$C_{вдт} = 82,6\%$					
$\Sigma V_{сух.}$	—	749,5			$C_{тв}^V = 80,1\%$					
Вода	185,5	185,5								
M <sub>б.с.</sub>	2411,5	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	935								



Таблица 3

Физико-технические показатели порошково-активированных песчаных бетонов на отсевах дробления известняка с различным содержанием  $TiO_2$

ПАПБ-9										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,266	$\rho_{вл}$ 1 сут.	0,43	1	0,67	$R_{сж}=78$	$R_{сж}=116$	$R_{сж}=130$
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4		2392	$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$			$R_{из}=10$	$R_{из}=13,1$	$R_{из}=18,5$
Известняк молотый ( $P_M$ ), $S_{уд} = 3400 \text{ см}^2/\Gamma$	300	111,1	0,085	$\rho_{теор}$ 2456	$I_{ПТ}^{вд} = 2,04$ $I_{ПЗ}^{вдт} = 4,52$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,38 \text{ кг/МПа};$ $R_{ц}^{уд} = 0,18 \text{ МПа/кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 37,8 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 7,02$		
Песок тонкий известняк. ( $P_T$ ), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		$K_{уп}$ 0,974	$V_{вд} = 528,9$ $C_{вд} = 54,9 \%$ $V_{вдт} = 788,1$ $C_{вдт} = 81,9 \%$ $C_{тв}^v = 80,6 \%$					
Песок крупный известняк. ( $P_3$ ), фр. 0,63÷2,5 мм	470	174	Распływ конуса Хегерманна 30 см, распływ $K_M$ 43 см							
$\Sigma M_{сух.}$	2177	—								
$\Sigma V_{сух.}$	—	775,5								
Вода	186,6	186,6								
$M_{б.с.}$	2363,6	—								
$V_{б.с.}$	—	962,1								
ПАПБ-10										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,266	$\rho_{вл}$ 1 сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=78$	$R_{сж}=119$	$R_{сж}=132$
$TiO_2$ 3% от Ц	21	4,9		2393	$\frac{\sum П}{Ц} = 2,1$			$R_{из}=10$	$R_{из}=14,1$	$R_{из}=18,7$
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4								
Известняк молотый ( $P_M$ ), $S_{уд} = 3400 \text{ см}^2/\Gamma$	300	111,1	0,085	$\rho_{теор}$ 2465	$I_{ПТ}^{вд} = 2,06$ $I_{ПЗ}^{вдт} = 4,55$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,30 \text{ кг/МПа};$ $R_{ц}^{уд} = 0,19 \text{ МПа/кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 37,4 \text{ кг/МПа}$ $R_{сж}/R_{и} = 7,06$		
Песок тонкий известняк. ( $P_T$ ), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		$K_{уп}$ 0,97	$V_{вд} = 533,8$ $C_{вд} = 55,2 \%$ $V_{вдт} = 793$ $C_{вдт} = 82 \%$ $C_{тв}^v = 80,7 \%$					
Песок крупный известняк. ( $P_3$ ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	174	Распływ конуса Хегерманна 30,8 см, распływ $K_M$ 44 см							
$\Sigma M_{сух.}$	2198	—								
$\Sigma V_{сух.}$	—	780,4								
Вода	186,6	186,6								
$M_{б.с.}$	2384,6	—								
$V_{б.с.}$	—	967								

ПАПБ-11										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,266	$\rho_{вл} 1$ сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=78$	$R_{сж}=119$	$R_{сж}=135$
TiO <sub>2</sub> 5% от Ц	35	8,2		2404						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4								
Известняк молотый (П <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3400 см <sup>2</sup> /Г	300	111,1	0,084	$\rho_{теор}$	$I_{Пт}^{вд} = 2,07$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,18 \text{ кг/МПа};$		
Песок тонкий известняк. (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		2472	$I_{Пз}^{вдт} = 4,57$					
				K <sub>уп</sub>	$V_{вд} = 537,1$					
Песок крупный известняк. (П <sub>з</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	174	Расплав конуса Хегерманна 31,5 см, расплав К <sub>М</sub> 45,5 см	0,972	$C_{вд} = 55,3 \%$			$R_{ц}^{уд} = 0,19 \text{ МПа/кг}$		
$\Sigma M_{сух.}$	2212	—		$V_{вдт} = 796,3$			$\Pi_{R_{и}}^{уд} = 36,6 \text{ кг/МПа}$			
$\Sigma V_{сух.}$	—	783,7		$C_{вдт} = 82,06 \%$			$R_{сж}/R_{и} = 7,07$			
Вода	186,6	186,6		$C_{тв}^v = 80,7 \%$						
M <sub>б.с.</sub>	2398,6	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	970,3								
ПАПБ-12										
Портландцемент Египетский белый СЕМ 52,5	700	225,8	0,266	$\rho_{вл} 1$ сутки	0,43	1	0,67	$R_{сж}=77$	$R_{сж}=117$	$R_{сж}= 132$
TiO <sub>2</sub> 7% от Ц	49	11,5		2407						
ГП Melflux 5581F 1,0% от Ц	7	5,4								
Известняк молотый (П <sub>М</sub> ), S <sub>уд</sub> = 3400 см <sup>2</sup> /Г	300	111,1	0,084	$\rho_{теор}$	$I_{Пт}^{вд} = 2,08$			$\Pi_{R_c}^{уд} = 5,30 \text{ кг/МПа};$		
Песок тонкий известняк. (П <sub>Т</sub> ), фр. 0,16-0,63 мм	700	259,2		2478	$I_{Пз}^{вдт} = 4,59$					
				K <sub>уп</sub>	$V_{вд} = 540,4$					
Песок крупный известняк. (П <sub>з</sub> ) фр. 0,63÷2,5 мм	470	174	Расплав конуса Хегерманна 29,5 см, расплав К <sub>М</sub> 40 см	0,971	$C_{вд} = 55,5 \%$			$R_{ц}^{уд} = 0,19 \text{ МПа/кг}$		
$\Sigma M_{сух.}$	2226	—		$V_{вдт} = 799,6$			$\Pi_{R_{и}}^{уд} = 38,9 \text{ кг/МПа}$			
$\Sigma V_{сух.}$	—	787		$C_{вдт} = 82,1 \%$			$R_{сж}/R_{и} = 7,17$			
Вода	186,6	186,6		$C_{тв}^v = 80,8 \%$						
M <sub>б.с.</sub>	2412,6	—								
V <sub>б.с.</sub>	—	973,6								

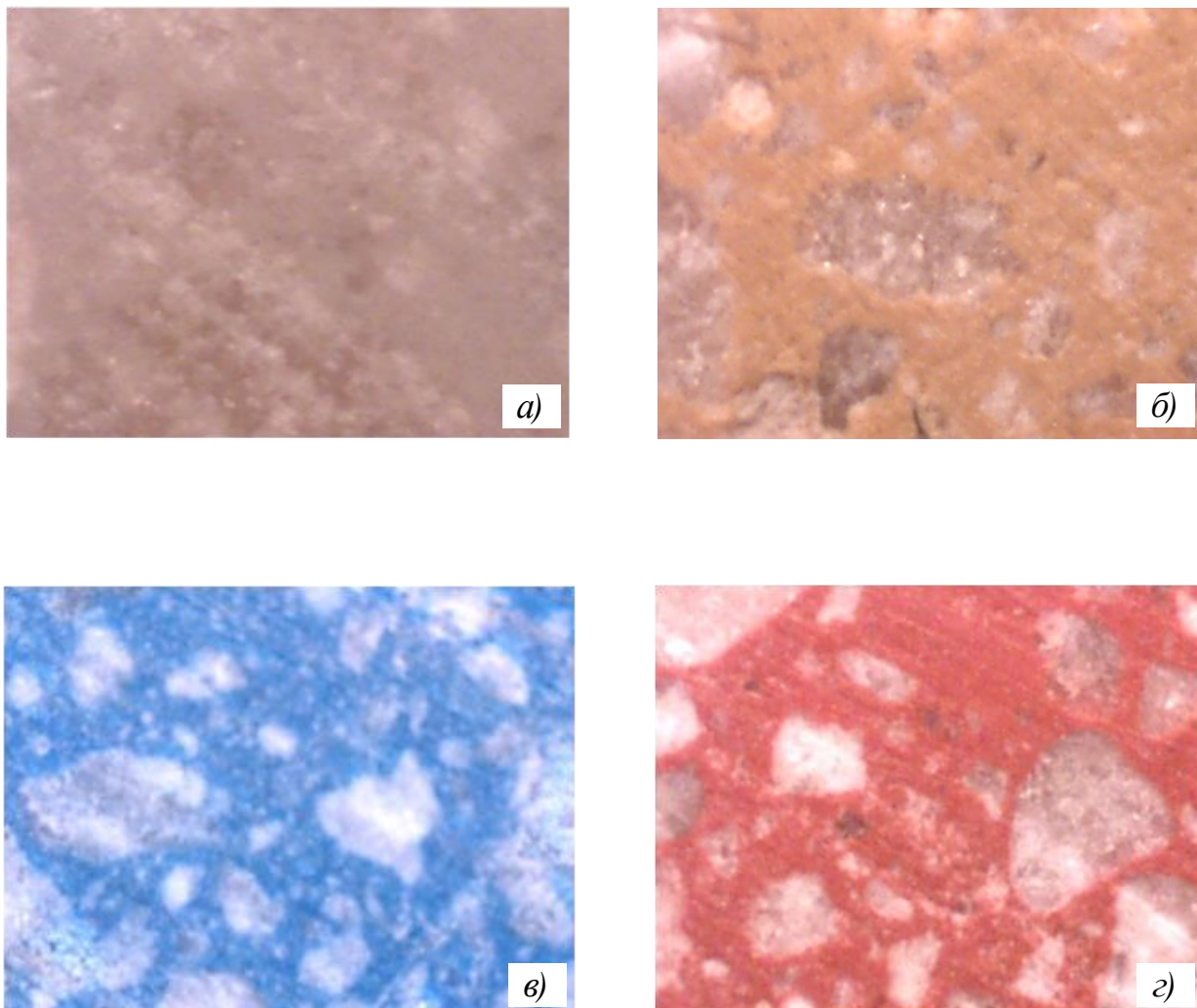


Рис. 1 Макроструктура архитектурно-декоративного самоуплотняющегося порошково-активированного песчаного бетона  $\times 30$ :

а) ПАПБ-9;      б) ПАПБ-21;      в) ПАПБ-22;      г) ПАПБ-20



«Пенза-Квартал»  
 Управление  
 Строительного  
 ООО «ПУС»  
 Ибрагимов Р.Р.

## ПРОТОКОЛ

испытания архитектурно-декоративных порошково-активированных бетонов  
 на морозостойкость

*Дата поступления образцов:* 30.10.2014

*От кого поступил:* аспиранта кафедры «ТСМиД» Пензенского ГУАС  
 Суздальцева О.В.

*Вид бетона:* высокопрочный архитектурно-декоративный  
 самоуплотняющийся порошково-активированный песчаный бетон нового  
 поколения.

*Начало испытания:* 5.11.2014

*Конец испытания:* 25.12.2014

*Метод испытания:* Третий метод, ГОСТ 10060-2012

*Установленное число циклов попеременного замораживания и  
 оттаивания:* 35 циклов, что соответствует F1000.

*Прочность образцов до испытания:* 144 МПа.

*Прочность образцов после испытания:* 162 МПа.

*Прочность контрольных образцов, хранившихся в солевом растворе до  
 окончания испытания образцов на морозостойкость:* 165 МПа.

*Заключение о результатах испытания:* В процессе испытания на морозостойкость поступившего вида бетона, было выявлено, что после 19 циклов, что соответствует F600, появились незначительные высолы на поверхности образцов. После 35 циклов было отмечено увеличение массы образцов в среднем на 0,81% и уменьшение прочности на 1,85%.

Была установлена марка по морозостойкости F1000.

Главный технолог ООО «ПУС»

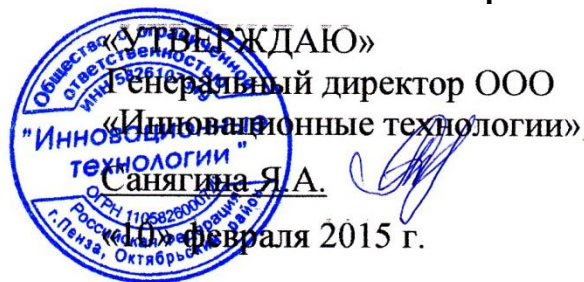
Инженер ОТКиЛ



Будников В.А.

Пауск В.В.





## А К Т

о внедрении результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Суздальцева Олега Владимировича

Комиссия в составе: председатель Санягина Яна Андреевна, члены комиссии: инженер-технолог Валиев Дамир Маратович ООО «Иновационные технологии» г. Пенза, научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ, советник РААСН, доктор технических наук, профессор Калашников В.И. и инженер-исследователь Пензенского государственного университета архитектуры и строительства Суздальцев Олег Владимирович, составили настоящий акт о том, что на основании проведенных исследований в ФГБОУ ВПО ПГУАС по теме «Долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород», выпущена опытная партия и переданы рекомендации для организации промышленного производства на ООО «Иновационные технологии» мелкоштучных декоративных изделий и элементов благоустройства из бетона, а также бетонных блоков с поверхностью, имитирующей гранит, для постамента монументального архитектурно-скульптурного ансамбля «Памятник русскому писателю А.И.Куприну» на основе архитектурно-декоративных бетонов нового поколения с использованием отходов дробления гранита и известняка.

**Председатель комиссии**

ООО «Иновационные технологии» г. Пенза

Санягина Я.А. **Члены комиссии:**Инженер-технолог: Валиев Д.М. Научный руководитель: Калашников В.И. Инженер-исследователь: Суздальцев О.В. 