

На правах рукописи



Петров Андрей Геннадьевич

**ДОРОЖНЫЙ ЦЕМЕНТОБЕТОН
НА АКТИВИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОМ
ВОДЕ ЗАТВОРЕНИЯ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Кудяков Александр Иванович.
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия» ТГАСУ Саркисов Юрий Сергеевич; доктор технических наук, доцент, декан факультета инженерных и информационных технологий НГАСУ Ильина Лилия Владимировна.
Ведущая организация:	ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Защита состоится «26» декабря 2013 года в 10 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 в Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 5, ауд. 307.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.О. Копаница

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В концепции социально-экономического развития России до 2020 года большое внимание уделяется развитию современной и эффективной транспортной инфраструктуры. Транспортно-эксплуатационные характеристики большинства отечественных автомобильных дорог не удовлетворяют требованиям мирового уровня. В настоящее время при строительстве автомобильных дорог используются, в основном, асфальтобетонные покрытия.

По результатам анализа отечественного и мирового опыта, современным требованиям к автомобильным дорогам, в наибольшей степени, удовлетворяют цементобетонные покрытия. Однако, в России их не более 3 %.

Основными преимуществами цементобетонных покрытий, по сравнению с асфальтобетонными, являются больший в 2-3 раза срок службы (при примерно одинаковой стоимости на строительство и ремонт), а также более высокий уровень транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог.

В процессе эксплуатации дорожных покрытий на цементные бетоны воздействуют: механические нагрузки, атмосферные осадки, агрессивные среды при градиенте температур. В связи с этим, к дорожному цементному бетону и покрытиям из него предъявляются повышенные требования по прочности, морозостойкости и однородности показателей качества. Так, в соответствии с требованиями национальных стандартов для обычного тяжелого бетона, коэффициент вариации по прочности составляет 13,5 %, а для дорожного бетона – 8 %.

Для повышения эксплуатационных характеристик дорожного цементобетона используют различные технологические приемы: активация воды или цемента, введение модифицирующих добавок, подбор зернового состава смеси заполнителя, а также проектирование состава бетонов.

Одним из эффективных способов повышения уровня параметров качества цементного бетона для дорожных покрытий является активация воды затворения ультразвуком, стабилизация структурно-технологических характеристик смеси заполнителя, а также проектирование состава бетона с высокой степенью прогнозирования заданных свойств.

Разработка технологии цементного бетона для дорожных покрытий с повышенной стабильностью параметров качества и максимальным использованием местного сырья при строительстве автомобильных дорог в условиях Сибири является актуальной.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с комплексным проектом Министерства образования и науки Российской Федерации

(Постановление №218 от 09.04.2013 г., договор №109-12 НИОКТР от 03.09.2012 г., а также государственного контракта № 349/3307 н на выполнение прикладных научно-исследовательских работ в интересах экономики и социальной сферы Томской области в 2013 году.

Объект исследования – дорожные цементобетоны для устройства покрытий автомобильных дорог.

Предмет исследования – процессы активации воды затворения ультразвуком, разработки составов дорожного бетона с высокими эксплуатационными характеристиками, а также исследование свойств полученных дорожных цементобетонов применительно к условиям Сибирского региона.

Цель работы – разработать научно-обоснованные составы и технологические приемы приготовления дорожного цементобетона с высокой прочностью, морозостойкостью и однородными показателями качества с использованием воды, активированной многочастотными ультразвуковыми волнами.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Обосновать выбор основных технологических приемов создания однородной бетонной смеси и бетона с высокой морозостойкостью и прочностью, применительно к условиям эксплуатации в Сибири и с использованием местного сырья.

2. Исследовать режимы и влияние активированной многочастотным ультразвуком воды затворения на свойства цементного теста и камня.

3. Установить закономерности влияния зернового состава заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона на активированной воде затворения.

4. Исследовать эксплуатационные характеристики дорожного цементобетона на активированной воде затворения.

5. Разработать технологию получения дорожного цементобетона с требуемыми эксплуатационными характеристиками и провести ее опытно-промышленную апробацию.

6. Оценить технико-экономическую эффективность применения цементных бетонов для строительства автомобильных дорог.

Научная новизна:

1. Установлено, что при активации воды затворения многочастотным ультразвуком (100 Гц, 22 кГц, 48 кГц) происходит деструкция воды за счет кавитации, повышается кислотность ($\text{pH}=9,3$), увеличивается электропроводность на 13 %, что приводит к ускорению степени гидратации цемента на 6 % и повышению прочности цементного камня на 20 %.

2. Установлено, что при ультразвуковой активации воды затворения повышается пластичность цементного теста на 10-20 % и замедляется на

50 минут начало срока схватывания, что позволило повысить удобоукладываемость и обеспечить живучесть бетонной смеси, разработать технологию приготовления бетонной смеси на активированной воде затворения и заполнителе с малой межзерновой пустотностью.

3. Установлено, что в бетонах на монофракционном крупном заполнителе и многочастотной ультразвуковой активации воды затворения, повышается однородность параметров качества, что позволило уменьшить показатель изменчивости до 6...7 % и повысить класс бетона по прочности.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны технологические режимы ультразвуковой активации воды затворения для практического использования в технологии цементного бетона для дорожного строительства.

2. Разработаны технологические приемы приготовления дорожных цементных бетонов с высокой морозостойкостью, прочностью и однородностью параметров качества бетона на активированной многочастотным ультразвуком воде затворения и монофракционном заполнителе.

3. Разработана методика проектирования и установлены рациональные составы цементного бетона, предназначенные для устройства покрытия автомобильных дорог в условиях Западной Сибири.

4. Разработана нормативно-технологическая документация для приготовления дорожных цементобетонов: технологический регламент, технические условия (ТУ 5846-047-02069295-2007 «Плита переходная железобетонная», ТУ 5850-048-02069295-2007 «Плиты откосов железобетонные», ТУ 5846-045-02069295-2007 «Блок плит проезжей части»)

Реализация результатов исследований: Проведены опытно-промышленные испытания бетона и внедрена технология, включающая ультразвуковую активацию и методику подбора состава бетона в ООО «Роскитстрой» г. Асино, разработан и передан для внедрения в ООО «ТОП-Бетон» г. Томск «Технологический регламент на производство бетонных смесей с активированной водой затворения», результаты работы в виде методик внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ТГАСУ) при проведении занятий по курсам «Строительные материалы», «Дорожно-строительные материалы», «Технология бетонных и железобетонных изделий и конструкций».

Личный вклад автора: состоит в постановке задач исследования, выборе методов их решения, разработке рецептур составов и технологических приемов приготовления дорожного бетона, проведении экспериментов и обобщении результатов исследований.

Достоверность основных положений: обеспечена методически обоснованным комплексом исследований с использованием стандартных средств и методов измерений, применением современных физико-химических методов, использованием статистической обработки результатов экспериментов. Полученные данные не противоречат известным положениям строительного материаловедения и результатам других авторов.

На защиту выносятся:

- научно обоснованные режимы активации воды затворения много-частотным ультразвуком и принципы подбора зернового состава заполнителя для приготовления бетонной смеси;
- экспериментально установленные зависимости свойств цементного теста и камня от времени многочастотной ультразвуковой обработки воды затворения;
- результаты исследований по влиянию монофракционного заполнителя и активированной ультразвуком воды затворения на свойства бетонной смеси и бетона;
- рецептурно-технологические параметры цементного тяжелого бетона на активированной воде затворения, позволяющие регулировать технические параметры дорожного покрытия автомобильных дорог;
- технология цементного бетона для дорожного строительства;
- результаты опытно-промышленных испытаний;
- технико-экономические показатели разработанной технологии дорожного бетона.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены на: всероссийской конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли» (г. Новосибирск, 2008 г.); 55-58-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых ТГАСУ (г. Томск, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.); международной научно-технической конференции «Новые технологии в строительном материаловедении» (г. Новосибирск, 2012 г.); IX международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2012 г.), I Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Перспективные материалы в технике и строительстве» (г. Томск, 2013 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 2 статьи в рекомендованных ВАК изданиях.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов по работе, списка использованной литературы, включающего 114 наименований работ, и приложений. Диссертация изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 39 таблиц, 26 рисунков, приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены – актуальность проблемы, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе приведен анализ отечественной и мировой литературы, показаны преимущества цементобетонных покрытий, а также факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики дорожного цементобетона. Удельный вес дорожных одежд с цементобетонными покрытиями в развитых странах составляет: Германия – 31 %, США – 35 %, Бельгия – 41 %. Фактический срок службы этих покрытий составляет 26 лет. На магистральных автомобильных дорогах России преобладают нежесткие дорожные одежды с асфальтобетонными покрытиями.

Для анализа факторов, влияющих на повышение качества дорожного цементобетона, были использованы инструменты системного подхода. С использованием литературных данных, а также собственных исследований, построена причинно-следственная диаграмма Исикавы управления качеством дорожного цементобетона, которая представлена на рис. 1.

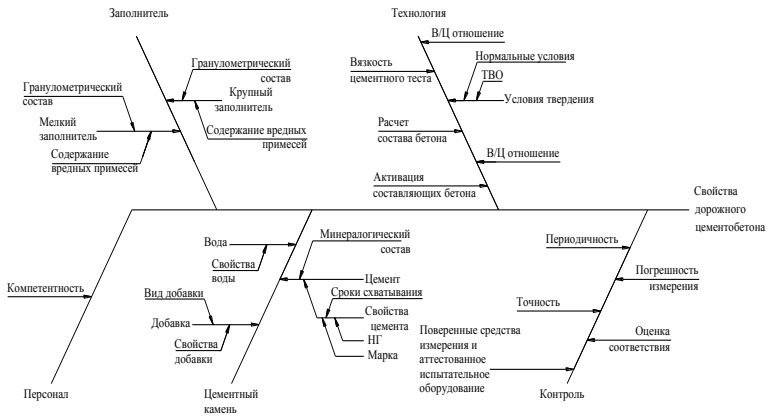


Рисунок 1. Влияние различных факторов на требуемые свойства дорожного цементобетона и их взаимосвязь.

В соответствии с диаграммой, определены и проранжированы основные факторы, влияющие на формирование уровня и стабильности качества дорожного бетона. Для оценки качества цементобетона приняты следующие характеристики: прочность, морозостойкость и однородность. На указанные параметры качества оказывают влияние: материалы (вода, цемент, заполнители, модифицирующие добавки), технология (активация

составляющих бетона, подбор состава бетона, условия приготовления, транспортирования и твердения смеси) и система контроля качества.

Наиболее активными составляющими бетонной смеси являются цемент и вода. Скорость и степень гидратации цемента существенно влияют на структурообразование и прочность бетона.

По результатам исследований Зубрилова С.П., Бердова Г.И., Горленко Н.П., Саркисова Ю.С., известные способы активации воды можно классифицировать на механические, химические и комбинированные.

Достаточно хорошо изучена и нашла широкое применение в различных отраслях промышленности одноволновая ультразвуковая активация. Остаются малоизученными вопросы активации воды затворения многоволновыми ультразвуковыми колебаниями применительно к дорожным цементобетонам.

Вопросы управления составами и свойствами модифицированных бетонов для экстремальных условий эксплуатации отражены в работах Баженова Ю.М., Боженова П.И., Трофимова Б.Я., Калашникова В.И., Ильиной Л.В., Штарка И., Людвиг У.

Как известно, на прочность и морозостойкость дорожного цементобетона большое влияние оказывает межзерновая пустотность смеси заполнителя. Так, при одинаковом значении В/Ц можно получить бетоны с существенным отличием по прочности и показателю изменчивости, используя смеси заполнителя с различным фракционным составом и межзерновой пустотностью смеси заполнителя.

При разработке расчетных формул прогнозирования прочности бетона, необходимо, кроме В/Ц и активности цемента, учитывать межзерновую пустотность заполнителя и объем цементного теста в бетоне.

Используемый в технологии бетона крупный заполнитель обладает неоднородностью распределения по размерам зерен. Поэтому, с целью стабилизации зернового состава и, соответственно, структуры и качества бетона, крупный заполнитель рекомендуют рассеивать по фракциям 5-10, 10-20 и 20-40 мм. Рациональная смесь фракций крупного заполнителя устанавливается по наибольшей плотности, минимальной пустотности и определяется в насыпном, в виброуплотненном состоянии сухих зерен или в воде.

Для повышения уровня и стабильности качества дорожного цементобетона необходимо провести исследования влияния многочастотной ультразвуковой активации воды затворения и зернового состава заполнителя на свойства цементного камня и бетона.

Во второй главе приведены основные характеристики применяемых материалов и описаны методы экспериментальных исследований.

В качестве вяжущего для изучения физико-механических свойств цементного камня и бетонов использовался портландцемент ПЦ-400-Д0 производства ООО «Топкинский цемент» (ГОСТ 10178-85).

В качестве мелкого заполнителя использовались пески Кудровского, Айдаковского и Стрежевского месторождений, а также песок ОАО «Томская судоходная компания» (ГОСТ 8736-93).

В качестве крупного заполнителя применялся гравий и щебень из гравия ОАО «Томская судоходная компания» (ГОСТ 8267-93).

Для затворения бетонной смеси использовалась вода из городской водопроводной сети, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-79.

Для приготовления тяжелого бетона применялся суперпластификатор «Мурапласт ФК88»- водный раствор олигомеров на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида и модифицированных лигносульфанатов (ГОСТ 24211-2001).

Для активации воды затворения использовалось ультразвуковое устройство «Чистон АСУ 1-01», генерирующее волны с частотами 100 Гц, 22 кГц и 48 кГц.

Исследование физико-механических свойств цементного теста и камня, бетонной смеси и бетона на активированной воде затворения, проводилось в соответствии с методиками, регламентированными национальными стандартами.

Для определения структурно-технологических характеристик заполнителей (средняя плотность в уплотненном состоянии, межзерновая пустотность) использовалась методика их определения в цементном тесте с заданным значением В/Ц, обеспечивающим проектную прочность бетона. Ранее разработанная методика на кафедре «Строительные материалы и технологии» Томского ГАСУ, не учитывала изменение вязкости цементного теста при многочастотной активации воды затворения. Уменьшение вязкости цементного теста на активированной воде приводит к изменению структурно-технологических характеристик заполнителя, что существенно влияет на состав бетонной смеси и свойства бетона.

В третьей главе представлены результаты исследований процессов активации воды затворения, и их влияния на свойства цементного теста и камня. Одним из важных методов управления структурообразования цементного камня, улучшения характеристик бетона является направленное изменение физико-химических свойств воды затворения. Структуры твердения формируются в результате сложных физико-химических процессов взаимодействия цемента с водой: растворение и гидратация цементных материалов с образованием пересыщенных растворов, самопроизвольное диспергирование этих минералов до частиц

коллоидных размеров, образование тиксотропных коагуляционных структур и, наконец, возникновение, рост и упрочнение кристаллизационных структур. Наиболее эффективным способом активации воды затворения бетонных смесей является ультразвуковая активация.

Время оптимального воздействия многочастотными ультразвуковыми колебаниями на воду затворения определялось по критерию изменения прочности цементного камня. Максимальная прочность цементного камня (рис. 2) достигается при 30 минутной активации воды затворения.

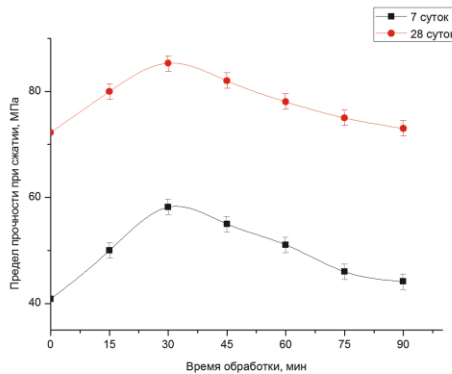
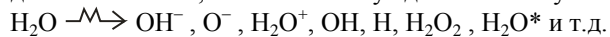


Рисунок 2. Влияние времени активации воды затворения на предел прочности при сжатии цементного камня.

При ультразвуковой обработке воды повышается водородный показатель ($pH=9,3$), который сохраняется в течение 30 минут (рис. 3), что объясняется деструкцией молекул воды за счет явления кавитации. По данным Зубрилова С.П., происходит частичный разрыв водородных и химических связей молекул воды, что приводит к образованию довольно устойчивых радикалов и ионов, а также к возбуждению молекул воды:



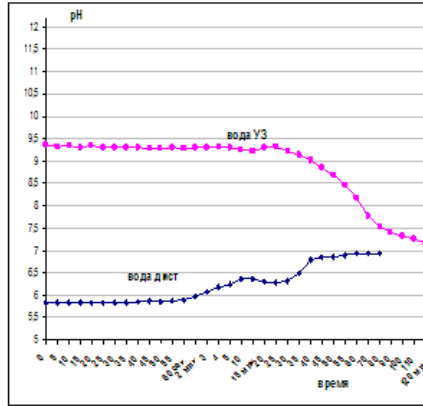


Рисунок 3. Изменение значения pH активированной ультразвуком воды с течением времени.

При ультразвуковой активации воды цементное тесто становится более пластичным. Уменьшается нормальная густота на 2 %, увеличивается начальный срок схватывания цементного теста со 120 до 170 минут, что благоприятно влияет на увеличение живучести.

Кинетика роста прочности образцов из цементного камня на активированной и неактивированной воде, приведены на рис. 4. Как следует из рис. 4, прирост прочности цементного камня в 28 суточном возрасте составляет 20 %.

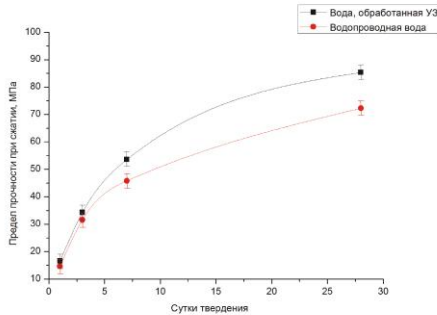


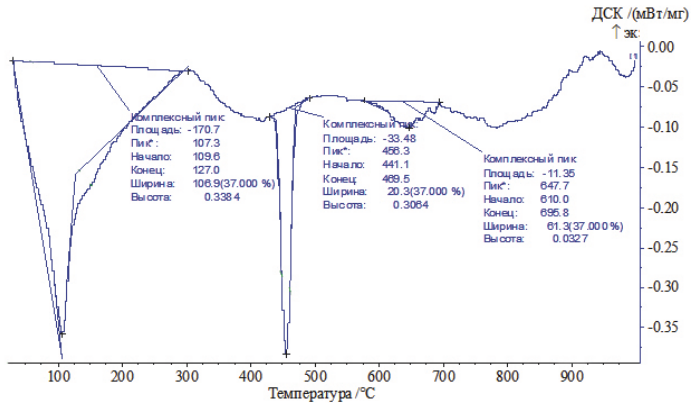
Рисунок 4. Кинетика набора прочности цементного камня на активированной и неактивированной воде затвердения.

Для оценки фазовых изменений в затвердевшем цементном камне на активированной ультразвуком воде затвердения, были проведены фи-

зико-химические исследования: термогравиметрический и рентгенофазовый анализы.

На термограммах образцов, приготовленных на активированной воде затворения, площадь эндотермического пика при 460 °С, характеризующего разложение $\text{Ca}(\text{OH})_2$, больше на 4 %, а при 660 °С - разложение низкоосновных гидросиликатов кальция почти в 2 раза больше, чем у образцов приготовленных на водопроводной воде (рис. 5).

а)



б)

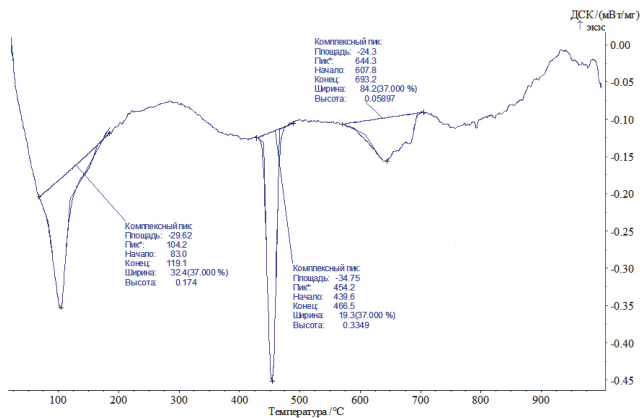


Рисунок 5. Дериватограммы образцов цементного камня: а - контрольный; б – на активированной воде.

Рентгенофазовый анализ подтверждает образование портландита Ca(OH)_2 (4,92; 2,63; 1,92; 1,79; 1,48; 1,44Å) и низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H (I) (3,07; 2,82; 1,83 Å), C-S-H (II) (3,07; 4,90; 1,62 Å)) с большей интенсивностью, чем у контрольных образцов. Увеличивается интенсивность пика CaCO_3 (3,04; 3,86; 2,28Å)

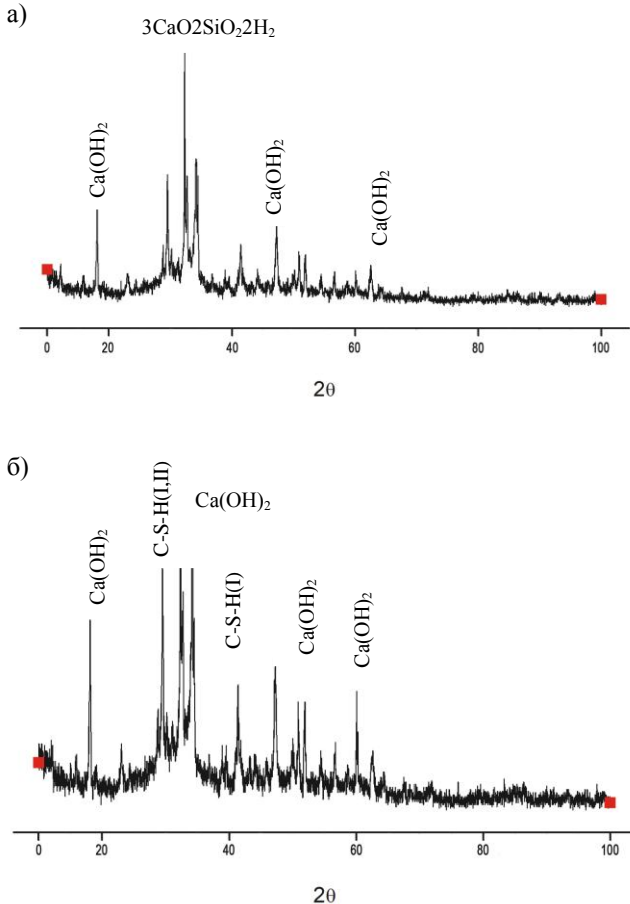


Рисунок 6. Рентгенофазовый анализ цементного камня: а - контрольный; б – на активированной воде.

В четвертой главе приводятся результаты исследований влияния зернового состава заполнителя на свойства бетонной смеси с активированной ультразвуком водой затворения и бетона.

При формировании дорожного цементобетона с высокой прочностью и стабильностью параметров качества, большое внимание уделяется созданию механически активного каркаса из крупного заполнителя узкой фракции с малой межзерновой пустотностью смеси. Механически активный каркас из зерен крупного заполнителя, согласно классификации Боженова П.И., способствует увеличению прочности, модуля упругости и уменьшению усадочных напряжений в бетоне. В настоящее время нет единого мнения по назначению рационального соотношения размеров смежных фракций крупного заполнителя. Считается оптимальным соотношение 1:2 или 1:4. В соответствии с требованиями ГОСТ 26633-91*, крупный заполнитель содержит 2 или 3 смежные фракции. При несоответствии крупного заполнителя требованиям ГОСТ 26633-91* по зерновому составу, предусматривается рассев заполнителя по фракциям и их смешивание.

Роль крупного заполнителя сводится к созданию механически активного каркаса, а свойства бетонной смеси и бетона необходимо регулировать с учетом значений межзерновой пустотности смеси заполнителя. Проводились исследования по влиянию отношения наибольшего диаметра крупного заполнителя к наименьшему в пределах одной фракции, т.е. внутрифракционного распределения (интервал крупности) на межзерновую пустотность крупного заполнителя, а также на свойства бетонной смеси и бетона на активированной и неактивированной воде затворения. Крупный заполнитель рассеивался на фракции 5...20 мм, 10...20 мм и 15...20 мм, что соответствует интервалу крупности 1,33; 2 и 4, соответственно.

Межзерновая пустотность крупного заполнителя и смеси фракций определялась с учетом смазки цементным тестом с заданным В/Ц по методике, приведенной в разделе 2.

При проведении исследований использовались в качестве крупного заполнителя - гравий и цементное тесто при В/Ц= 0,5 с активированной и неактивированной водой затворения.

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние интервала крупности на межзерновую пустотность крупного заполнителя

Класс фракции крупного заполнителя	Показатели	
	Rm Среднее значение	Vm, % Коэффициент вариации
5...20	37,3/37,2*	12,4/12,1
10...20	37,6/37,6	11,7/11,0
15...20	37,8/37,8	8,9/8,6

Примечание: при использовании цементного теста в числителе – с водопроводной водой, в знаменателе – с активированной водой.

При изменении интервала крупности от 1,33 до 4 межзерновая пустотность гравия изменяется незначительно от 37,8 % до 37,3 %, а коэффициент вариации уменьшается с 12,4 % до 8,9 % с цементным тестом на водопроводной воде, а на цементном тесте с активированной водой с 12,1 % до 8,6 %.

Исследования влияния отдельных фракций крупного заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона на активированной и неактивированной воде затворения проводились с использованием гравия при значениях В/Ц=0,5 и содержании цементного теста 200, 240 л/м³, т.е. для малоподвижных и подвижных бетонных смесей.

По результатам исследований, с уменьшением интервала крупности гравия при постоянном объеме цементного теста и В/Ц, удобоукладываемость бетонной смеси (подвижность) увеличивается. Улучшение удобоукладываемости объясняется уменьшением суммарной поверхности крупного заполнителя, что в свою очередь приводит к увеличению толщины обмазки цементным тестом поверхности более крупных зерен. С уменьшением интервала крупности с 4 до 1,33 однородность значений удобоукладываемости бетонной смеси повышается на 30 %. Абсолютное значение однородности удобоукладываемости бетонной смеси при использовании фракции 15...20 мм достигает 6,5 %.

При постоянном объеме цементного теста и В/Ц прочность бетона на щебне из гравия с интервалом крупности 1,33 (15...20 мм) выше, чем на заполнителе с интервалом крупности 4 (5...20 мм). Среднее значение предела прочности при сжатии образцов бетона, приготовленных на крупном заполнителе фракции 5...20 мм на неактивированной воде равно 42,2 МПа, на активированной – 48,5 МПа, а на фракции 15...20 мм на неактивированной воде – 46,5 МПа, на активированной - 51,8 МПа, таким образом, прирост прочности при переходе к узкой фракции составил в

среднем около 10 %. Повышение прочности бетона объясняется созданием механически активного каркаса. В щебне из гравия с интервалом крупности 4 образуется неустойчивый каркас из-за наличия зерен средних фракций. Статобработка результатов исследования прочности бетона показывает, что однородность показателей качества повышается с переходом от фракции крупного заполнителя 5...20 мм к фракции 15...20 мм. Использование активированной воды затворения при приготовлении бетонной смеси способствует повышению показателей однородности. Так, например, при объеме цементного теста 200 л/м³ и В/Ц= 0,5, коэффициент вариации прочности бетона, приготовленного на активированной воде затворения, составил 6,8 %, для бетонов без активированной воды – 8,1 %. В дальнейших исследованиях в качестве крупного заполнителя использовалась фракция 10...20 мм.

На прогнозирование свойств бетонов на монофракционном заполнителе с активированной водой затворения большое влияние оказывает межзерновая пустотность.

На рис. 7 приведены данные по влиянию межзерновой пустотности заполнителя и количества цементного теста на удобоукладываемость бетонной смеси, приготовленной на активированной и неактивированной воде затворения при В/Ц = 0,4.

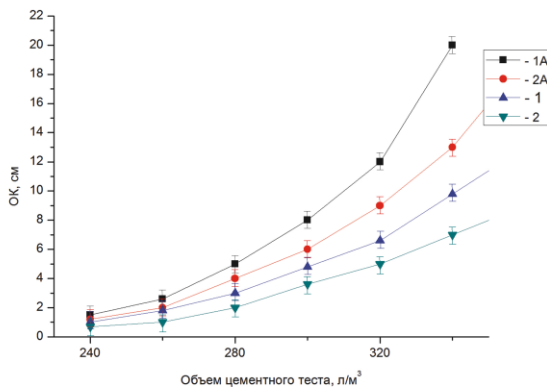


Рисунок 7. Зависимость удобоукладываемости бетонной смеси от содержания цементного теста при В/Ц=0,4: 1 – бетонная смесь, приготовленная на щебне из гравия 10-20 мм, МПЗ смеси=18,7 %, без активации воды затворения; 2 – бетонная смесь, приготовленная на щебне из гравия 10-20 мм, МПЗ смеси=20,6 %, без активации воды затворения; 1А – бетонная смесь, приготовленная на щебне из гравия 10-20 мм, МПЗ смеси=18,7 %, с активацией воды затворения; 2А - бетонная смесь, приготовленная на щебне из гравия 10-20 мм, МПЗ смеси=20,5 %, с активацией воды затворения.

При уменьшении МПЗ заполнителей без активации воды затворения улучшается удобоукладываемость бетонной смеси (при одинаковом содержании цементного теста и В/Ц) или сокращается расход цементного теста (при одинаковой удобоукладываемости). Активация воды затворения приводит к еще большему увеличению подвижности бетонной смеси. Аналогичные зависимости получены в бетонных смесях при значении В/Ц = 0,45 и 0,5.

На рис. 8 представлены зависимости прочности бетона от содержания цементного теста, приготовленного на активированной и не активированной воде при В/Ц= 0,4.

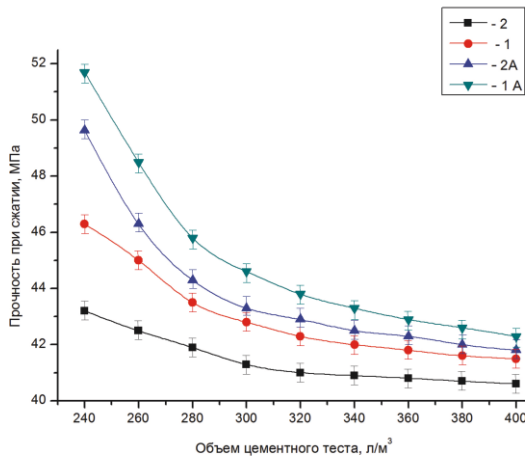


Рисунок 8. Зависимость прочности бетона от содержания цементного теста при В/Ц=0,40: 1 – тяжелый бетон на щебне из гравия фракции 10-20 мм, МПЗ смеси=18,7 %, без активации воды затворения; 2 - тяжелый бетон на щебне из гравия фракции 10-20 мм, МПЗ смеси=20,6 %, без активации воды затворения; 1А - тяжелый бетон на щебне из гравия фракции 10-20 мм, МПЗ смеси=18,7 %, с активацией воды затворения; 2А - тяжелый бетон на щебне из гравия фракции 10-20 мм, МПЗ смеси=20,5 %, с активацией воды затворения.

При приготовлении бетонной смеси на активированной воде затворения при одинаковом объеме цементного теста и В/Ц, прочность дорожного цементобетона возрастает. Так, при В/Ц=0,40 и объеме цементного теста 240 л/м³, прочность контрольного состава бетона (кривая 2, МПЗ= 20,6 %) составила 43,2 МПа, прочность состава бетона приготовленного на активированной воде затворения (кривая 2а, МПЗ= 20,5 %) – 49,64 МПа. Таким образом, прирост прочности бетона, приготовленного

на активированной воде затворения, составил 14,8 %. С увеличением объема цементного теста прочность бетона как активированного, так и неактивированного уменьшается. Понижение прочности дорожного цементобетона объясняется увеличением толщины пленки цементного теста на поверхности заполнителя и снижением роли механически активного каркаса. Чем толще пленка, тем меньше прочность бетона, так как усилия передаются через более слабое звено бетона. На основе экспериментальных данных, получена следующая зависимость прочности бетона от объемов цементного теста, межзерновой пустотности, В/Ц-отношения и прочности цемента на активированной воде:

$$R_o = \frac{0,19R_u \left(\frac{1 - V_{цт}}{0,17 + V_{мпз}/5} \right)}{В / Ц} - 0,35R_u, \quad (1)$$

где $V_{цт}$ $V_{мпз}$ – соответственно объем цементного теста в бетоне и объем межзерновых пустот заполнителя, л/м³.

Разница между значениями прочности, определенными расчетным и экспериментальными методами составляет не более 5 %.

С использованием результатов исследований усовершенствована методика проектирования состава тяжелого дорожного цементобетона на заполнителях с малой межзерновой пустотностью и активированной воде затворения, учитывающая изменения вязкости цементного теста (В/Ц). При разработке данной методики учтены следующие полученные научные результаты:

- обоснование выбора крупного заполнителя по интервалу крупности;
- подбор состава смеси заполнителей с учетом смазки цементного теста с активированной водой затворения;
- прогнозирование подвижности бетонной смеси в зависимости от объема межзерновых пустот и объема цементного теста в бетонной смеси;
- прогнозирование прочности бетона с учетом изменения прочности цементного камня на активированной ультразвуком воде затворения, а также - объема межзерновых пустот и цементного теста с заданным значением В/Ц.

На основе данной методики были разработаны составы дорожного цементобетона на активированной ультразвуком воде затворения для исследования их эксплуатационных характеристик. Составы и характеристики бетонной смеси приведены в табл.2.

Таблица 2

Составы дорожного цементобетона

№ состава	Содержание компонентов, кг/м ³					В/Ц	МПЗ, %	О.К., см
	щебень	песок	цемент	вода	добавка			
1	1194	582	436	175	-	0,4	18,7	4
2	1181	595	436	160	0,8	0,37	18,7	8
3	1199	604	396	178	-	0,45	17,7	4
4	1183	621	396	163	0,8	0,41	17,7	7

Результаты испытаний бетона на прочность при сжатии, растяжении при изгибе, морозостойкость, начальный модуль упругости и коэффициента Пуассона приведены в табл.3.

Таблица 3

Эксплуатационные характеристики дорожного цементобетона

Номер состава	Прочность бетона, МПа		Класс Бетона	П, * %	Нач. модуль упругости, 10 ³ МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности при растяжении при изгибе (класс), МПа
	кубиковая	призменная					
1	41,83	30,12	B30	4,6	32,7	0,17	5,8 (B _{тв} 4.4)
2	49,17	37,86	B35	4,4	35,8	0,16	6,5 (B _{тв} 4.8)
3	37,18	26,31	B27,5	4,7	31,5	0,18	5,3 (B _{тв} 4.0)
4	45,99	34,49	B35	4,32	34,7	0,17	6,3 (B _{тв} 4.8)

*П**- потеря прочности дорожного бетона на сжатие после 400 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Все разработанные составы выдержали 400 циклов переменного замораживания и оттаивания.

При проектировании состава морозостойкого дорожного бетона используют рекомендации по расходу цемента, указанные в СНиПе 82-02-95, без учета характеристик заполнителя и активации воды затворения. Минимальный расход цемента, обеспечивающий получение требуемой морозостойкости, зависит от межзерновой пустотности смеси заполнителей, объема цементного теста и В/Ц с учетом активированной воды затворения.

Использование активированной многочастотным ультразвуком воды затворения и монофракционного заполнителя позволяет получать морозостойкие бетоны при более низких расходах цемента, чем рекомендованные СНиПом.

Дорожные цементобетоны, приготовленные на активированной воде затворения из равноподвижных бетонных смесей, обладают большей прочностью на растяжении при изгибе и модулем упругости. Уменьшение

МПЗ и снижение В/Ц за счет активации воды затворения и введения добавки пластификатора приводит к повышению начального модуля упругости, призмочной прочности.

Все разработанные составы бетонов соответствуют требованиям СНиП 2.05.02-85* и ВСН 197-91. Предел прочности при растяжении при изгибе на одну марку выше, а по морозостойкости на две марки выше требований нормативных документов.

В пятой главе приведена технология приготовления бетонной смеси с активированной ультразвуком водой затворения.

Предлагаемая технологическая схема приготовления бетонной смеси отличается от традиционной установкой двух емкостей - емкости с ультразвуковым активатором и емкости-накопителя, которые легко встраиваются в технологическую схему уже существующего бетоносмесительного узла (рис.9).

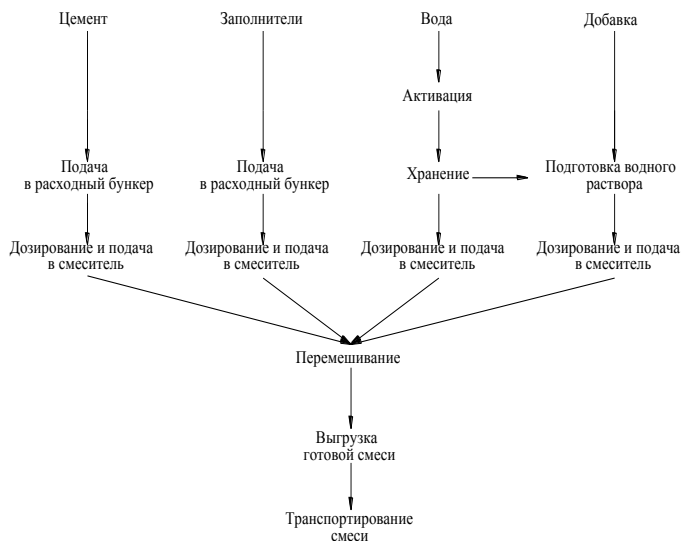


Рисунок 9. Принципиальная технологическая схема приготовления бетонной смеси.

Технико-экономическими расчетами показано, что себестоимость 1 м^3 бетонной смеси, приготовленной с использованием активированной ультразвуком воды затворения и монофракции, на 6,7 % ниже себестоимости бетонной смеси, приготовленной традиционным способом. Срок

окупаемости при внедрении новых технологий с учетом модернизации оборудования составил 1 год и 3 месяца.

Проведенные опытно-промышленные испытания в ООО «Роскитстрой» подтвердили достоверность научных результатов и эффективность, разработанной технологии приготовления бетонной смеси на активированной воде затворения и применения монофракционного заполнителя. Увеличение подвижности бетонной смеси составило 12...15 %, прочности бетона - 15...20 %. При равной подвижности бетонной смеси и прочности бетона экономия цемента составляет 40 кг на 1 м³.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показана возможность получения тяжелого бетона для дорожного строительства на основе активированной многочастотным ультразвуком воды затворения и монофракционного заполнителя с малой межзерновой пустотностью.

2. Оптимальное время ультразвукового воздействия на воду затворения 30 мин. Цементное тесто на активированной воде затворения становится более пластичным, замедляется начальный срок схватывания, что положительно сказывается на живучести дорожных цементобетонных смесей.

3. Активация воды способствует повышению степени гидратации цемента, увеличивается в цементном камне количество низкоосновных гидросиликатов кальция и портландита.

4. Показано, что при ультразвуковой обработке воды затворения увеличивается подвижность бетонной смеси при одинаковом объеме цементного теста и В/Ц-отношения, либо сокращается расход цементного теста при одинаковой подвижности.

5. Уменьшение межзерновой пустотности заполнителя совместно с комплексным модифицированием приводит к повышению прочности бетона при одинаковом объеме цементного теста и В/Ц, или к сокращению расхода цементного теста при одинаковой прочности бетона.

6. Разработана методика проектирования состава тяжелого бетона на заполнителях с малой межзерновой пустотностью и активированной воде затворения, учитывающая изменения вязкости цементного теста и прочности.

7. Разработаны нормативные документы на изделия с применением воды затворения активированной многочастотным ультразвуком ТУ 5846-047-02069295-2007 «Плита переходная железобетонная», ТУ 5850-048-02069295-2007 «Плиты откосов железобетонные», ТУ 5846-045-02069295-2007 «Блок плит проезжей части».

8. Разработана технологическая линия для приготовления дорожного цементобетона на активированной ультразвуком воде затворения и монофракционном заполнителе.

9. При комплексном модифицировании дорожной цементобетонной смеси, а именно активации воды затворения многочастотным ультразвуком, введением пластифицирующей добавки «Мурапласт ФК-88» и использованием монофракционного крупного заполнителя обеспечивается повышение прочности бетона на 20 %, уменьшение показателей изменчивости до 6 %, а при равной прочности бетона уменьшается расход цемента. Достигнутая марка по морозостойкости составляет F400.

10. По результатам проведенных опытно-промышленных испытаний бетонной смеси и бетона в ООО «РосКитСтрой» г. Асино Томской обл. доказана эффективность использования комплексной модификации компонентов бетонной смеси.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

В изданиях входящих в перечень ВАК

1. Сафронов, В.Н. Свойства твердеющих композиций на омагниченной воде / В.Н. Сафронов, Г.Г. Петров, С.А. Кугаевская, **А.Г. Петров** // Вестник ТГАСУ. – 2005. – № 1 – С.134–142.
2. Кудяков, А.И. Улучшение качества цементного камня путем многочастотной ультразвуковой активации воды затворения / А.И. Кудяков, **А.Г. Петров**, Г.Г. Петров, К.В. Иконникова // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 3. – С. 143–152.

В общероссийских журналах

3. Кудяков, А.И. Исследование однородности крупного заполнителя / А.И. Кудяков, Г.Г. Петров, **А.Г. Петров** // Проектирование и строительство в Сибири. – 2008. – № 1. – С. 14 – 15.

В сборниках международных и всероссийских конференций

4. Кудяков, А.И. Исследование однородности крупного заполнителя / А.И. Кудяков, Г.Г. Петров, **А.Г. Петров** // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные материалы и технологии в современном строительстве», Новосибирск, 2008. – С. 75 – 77.
5. **Петров, А.Г.** Тяжелый бетон для дорожного строительства / А.Г. Петров // Материалы VI Межрегиональной научно-технической конференции «Строительство: материалы, конструкции, технологии». – Братск, 2008. – С. 70–72.

6. Кудяков, А.И. Повышение качества дорожного бетона / А.И. Кудяков, Г.Г. Петров, **А.Г. Петров** // *Материалы Всероссийской конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли»; 65-я научно-техническая конференция НГАСУ, Новосибирск, 2008.* – С. 10.
7. **Петров, А.Г.** Тяжелые бетоны, приготовленные на активированной воде затворения / А.Г. Петров, Д.А. Смолин // *Материалы 55-й Научно-технической конференции студентов и молодых ученых.* – Томск, 2009. – С. 109–112.
8. **Петров, А.Г.** Ультразвуковая обработка воды затворения для приготовления тяжелых бетонов / А.Г. Петров, Д.А. Смолин // *Материалы I Всероссийской научно-технической конференции «Строительство: материалы, конструкции, технологии».* - Братск, 2009. – С. 99–102.
9. **Петров, А.Г.** Тяжелый бетон для дорожного строительства на активированной воде затворения / А.Г. Петров // *Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Молодая мысль: наука, технологии, инновации».* – Братск, 2010. – С. 165–166.
10. Иконникова, К.В. Индикация эффективности ультразвуковой обработки воды затворения цементных дисперсных систем / К.В. Иконникова, **А.Г. Петров, Г.Г. Петров, Л.Ф. Иконникова** // *Материалы XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы».* – Одесса: Из-во «Астропринт». – 2010. – С. 137–138.
11. Иконникова, К.В. Процессы гидратации цементной системы в воде дистиллированной и обработанной ультразвуком / К.В. Иконникова, **А.Г. Петров, Л.Ф. Иконникова, Г.Г. Петров** // *Сборник материалов 50 Международного симпозиума «Актуальные проблемы прочности».* – Витебск: Из-во ВГТУ.–2010. – С. 172–175.
12. Иконникова, К.В. Влияние способа подготовки воды на характер гидратации цемента / К.В. Иконникова, **А.Г. Петров, Г.Г. Петров, Л.Ф. Иконникова** // *Материалы VI Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций».* – Оренбург: Из-во ОГУ. – 2010. – С. 389–395.
13. **Кудяков, А.И.** Повышение качества цементного камня путем ультразвуковой активации воды затворения / А.И. Кудяков, Г.Г. Петров, **А.Г. Петров** // *Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Молодая мысль: наука, технологии, инновации».* – Братск, 2011. – С. 44–47.
14. **Петров, А.Г.** Повышение эксплуатационных характеристик дорожного цементобетона / А.Г. Петров // *Сборник научных трудов IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития».* – Новосибирск, 2012. – С. 102–103.

15. **Петров, А.Г.** Влияние зернового состава заполнителей на свойства тяжелого цементного бетона с активированной водой затворения / А.Г. Петров, А.И. Кудяков // Сборник научных трудов IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, 2012. – С. 764–766.

Подписано в печать 25.11.2013. Формат 60×84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изд.л. 1,15.
Тираж 100 экз. Заказ № 425

Изд-во ТГАСУ, 634003, г.Томск, пл. Соляная,2.
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ТГАСУ.
634003,г. Томск, ул. Партизанская, 15.