

На правах рукописи



Лахтарина Сергей Викторович

**ЛЕГКИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ С ПОВЫШЕННЫМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2016

Работа выполнена на кафедре технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры", г. Макеевка.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
ЗАЙЧЕНКО Николай Михайлович,
ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры",
заведующий кафедрой технологий
строительных конструкций, изделий и
материалов.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
НЕСВЕТАЕВ Григорий Васильевич,
Академия строительства и архитектуры
ФГБОУ ВО "Донской государственный
технический университет", заведующий
кафедрой технологии строительного
производства;

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, доцент
НАЗАРОВА Антонина Васильевна,
ГОУ ЛНР "Луганский национальный
аграрный университет", доцент кафедры
строительных конструкций.

Ведущая организация:

Академия строительства и архитектуры
ФГАОУ ВО "Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского".

Защита состоится "01" июля 2016 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан "___" _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.006.02



Назим Ярослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Снижение материалоемкости и уменьшение массы строительных конструкций без потери их несущей способности и эксплуатационных свойств является одним из основных факторов повышения эффективности строительства. Особенную актуальность это приобретает для высотного строительства, где одна из основных проблем связана с большими сжимающими нагрузками, которые передаются от верхних этажей зданий и сооружений нижним, что обуславливает увеличение давления на грунты. Большие нагрузки на вертикальные несущие конструкции приводят к увеличению сечений, что отрицательно сказывается на объемно-планировочных решениях зданий. Одновременно возникает необходимость в повышении процента армирования конструкций, что приводит к удорожанию стоимости объекта. Анализ публикаций показывает, что при проектировании современных зданий и сооружений наблюдается тенденция минимизации их собственного веса за счет применения в железобетонных конструкциях легких бетонов, в том числе высокопрочных. Кроме того, предъявляемые в настоящее время требования по архитектурной выразительности к зданиям и сооружениям, обуславливают необходимость использования преимущественно монолитного способа строительства. Для этого конструкционные легкие бетоны должны обладать одновременно высокими показателями удобоукладываемости смесей, что обеспечивает снижение трудоемкости работ по формированию конструкций на строительной площадке на 50% и увеличение производительности труда на 20%. Конструкции из легких бетонов позволяют улучшить до 25% теплотехнические характеристики, уменьшить тепловое расширение, повысить огнестойкость зданий. Применение легких бетонов в конструкциях зданий и сооружений обеспечивает снижение объема бетона до 46%, расхода арматуры в фундаментах до 54%, в балках до 21%. При этом стоимость строительства уменьшается до 15%.

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках госбюджетной научно-исследовательской тематики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры: Д-2-03-11 "Разработка новых высококачественных композиционных материалов в виде стойких к коррозии и высокопрочных бетонов, исследование особенностей их работы в условиях объемного напряженно-деформированного состояния и повышенных температур" (2011-2012 гг., № 0111U001805); Д-2-03-13 "Исследование характеристик физико-механических и реологических свойств высокопрочных модифицированных бетонов с фибровым армированием в диапазоне температур от +20° до +300°С" (2013-2014 гг., № 0113U001921).

Степень разработанности темы исследования. Работа основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых в области высокопрочных легких бетонов: Баженова Ю.М., Батракова В.Г., Бужевича Г.А., Горчакова Г.И., Дворкина Л.И., Довжика В.Г., Дорфа В.А., Житкевича Р.К., Звездова А.И., Иванова И.А., Макридина Н.И., Несвета-

ева Г.В., Орентлихер Л.П., Попова Н.А., Симонова М.З., Спивак Н.Я., Фаликман В.Р., Шорта А., Clarke, J.L., Craig, P., Dennis, W.S., Fergestad, S., Hoff, G.C., Holm, T.A., Kenneth, S., Yasar, E., Zhang, M.H. и др.

В работах ученых показано, что для получения высокопрочных легких бетонов используют, как правило, те же технологические приемы, что и для высокопрочных тяжелых бетонов. В то же время, отличительной особенностью легких бетонов является наличие пористого заполнителя, который ограничивает прочность бетона даже при повышенных расходах вяжущего, а также обуславливает проблемы с сохраняемостью подвижности бетонных смесей вследствие поглощения части воды затворения. Предварительное увлажнение заполнителя существенно усложняет технологию производства, зачастую приводит к снижению его прочности, а введение дополнительного количества воды затворения непосредственно перед укладкой на строительном объекте (Retempering, ACI 116), может существенно снижать прочность бетона (до 35% и больше). Более эффективным представляется способ введения избыточного количества воды затворения с превышением исходной подвижности по отношению к заданной. При этом, вода, поглощенная пористым заполнителем, в процессе твердения бетона будет служить источником внутреннего ухода, создавая предпосылки для формирования структуры с улучшенными механическими и деформационными характеристиками бетонов. В литературе достаточно широко освещены вопросы, связанные с внутренним уходом тяжелого бетона (Ковлер К., Фаликман В.Р., Aïtcin P.C., Bentur A., Bentz D.P., Jensen O.M., Hansen P.F., Lura P., Powers T.C. и др.), в значительно меньшей мере – для конструкционного легкого бетона.

Цель исследования – теоретическое и экспериментальное обоснование получения составов и технологии модифицированных органо-минеральными добавками высокопрочных легких бетонов, характеризующихся повышенными коэффициентами конструктивного качества и деформативными свойствами, на основе концепции внутреннего ухода за бетоном.

Задачи исследования:

- выполнить анализ существующих представлений о структуре и свойствах высокопрочных легких бетонов, влиянии минеральных и химических добавок на структурообразование и свойства бетонных смесей и бетонов;
- исследовать сохраняемость подвижности бетонной смеси при введении избыточного количества воды затворения с превышением исходной подвижности по отношению к заданной;
- разработать оптимальные составы высокопрочного легкого бетона по критерию максимального коэффициента конструктивного качества;
- исследовать закономерности влияния внутреннего ухода за бетоном на развитие деформаций, вызванных аутогенной и влажностной усадкой;
- установить закономерности влияния внутреннего ухода на формирование состава продуктов гидратации цементных паст, кинетику твердения легких бетонов;

- установить влияние содержания и физико-механических свойств пористых заполнителей на показатели средней плотности, прочности при сжатии и деформаций усадки высокопрочных легких бетонов;
- разработать технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов;
- осуществить опытно-промышленное внедрение результатов исследования и оценить их технико-экономическую эффективность.

Объект исследования – легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества.

Предмет исследования – процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры и свойств легких высокопрочных бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества на основе концепции внутреннего ухода.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование получения высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества и улучшенными деформативными характеристиками на основе установления закономерностей влияния органо-минеральных модификаторов и концепции внутреннего ухода на процессы формирования структуры и свойств бетона;
- определено фактическое значение водопоглощения керамзитового гравия в цементной пасте с добавкой органо-минеральных модификаторов, идентичной по составу легкогобетонной смеси, которое составляет 47% от величины водопоглощения в обычной воде, при этом водопоглощение в цементной пасте наиболее интенсивно происходит в течение первых 30 минут;
- по данным рентгенофазового и термогравиметрического анализов установлено, что внутренний уход за бетоном обеспечивает более высокую степень гидратации цементного камня, что иллюстрируется снижением интенсивностей дифракционных отражений алита ($d=0,277; 0,232; 0,183; 0,154$ нм) и повышением интенсивности линий гидросиликатов кальция ($d=0,301; 0,247; 0,208$ нм) в сравнении с образцами без внутреннего ухода;
- установлено, что внутренний уход за бетоном, реализуемый через введение расчетного объема дополнительной воды затворения, позволяет минимизировать аутогенную (собственную) усадку легкого бетона до величины $\varepsilon_{lca} = -100 \times 10^{-6}$, снизить на 35% усадку при высыхании, повысить прочность и модуль упругости бетона; компьютерное 2D-моделирование распределения водонасыщенных пористых заполнителей в структуре бетона свидетельствует о том, что весь объем цементной пасты обеспечен надлежащим внутренним уходом.

Практическое значение результатов диссертации:

- разработаны составы легких высокопрочных бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества, применение которых обеспечивает снижение материалоемкости зданий и сооружений, трудоемкости процессов строительного производства, повышение энергоэффективности зданий;

- выполнена оптимизация составов легких высокопрочных бетонов по критерию коэффициента конструктивного качества: при частичной замене плотных заполнителей пористыми (50% по объему плотного кварцевого песка керамзитовым / зольными сферами; 25% щебня гранитного – керамзитовым) получены бетоны с пределом прочности при сжатии 59,4/52,3 МПа, средней плотностью 1869/1823 кг/м³, коэффициентом конструктивного качества ККК=31/28;

- разработан технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества (000 "Донспецпром", г. Макеевка);

- рассмотрена целесообразность применения результатов исследования при проектировании элементов автодорожного моста, в частности, железобетонной плиты проезжей части; наружной монолитной несущей стены жилого дома конструктивной схемы типовой серии 87 (000 "Архионика", г. Таганрог);

- результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Донбасской национальной академии строительства и архитектуры при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01 (08.04.01) "Строительство", профиль "Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций" в курсах дисциплин "Бетоны и строительные растворы"; "Технология бетонных и железобетонных изделий и конструкций".

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования выполнены согласно стандартным и специальным методикам с использованием аттестованных средств измерений и испытательного оборудования. Состав продуктов гидратации вяжущего установлен по данным рентгенофазового анализа (ДРОН-4). Химическую усадку цементных паст определяли объемным методом согласно ASTM C1608-07 "Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste". Аутогенная усадка цементного камня и бетона измерялась согласно ASTM C1698-09 "Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar" на автоматизированных дилатометрах конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена. Эффективность внутреннего ухода легкого бетона оценивалась на основе показателя внутренней влажности твердеющих бетонов с использованием станции "Rotronic Hygroscope DT" (исследования выполнены в Датском Техническом Университете в рамках научной стажировки под руководством профессора О.М. Йенсена).

На защиту выносятся:

- обоснование возможности получения высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества с применением рядовых пористых заполнителей на основе установления закономерностей влияния органо-минеральных модификаторов и концепции внутреннего ухода на процессы формирования структуры и свойств бетона;

- результаты экспериментальных исследований влияния рецептурных факторов на технологические свойства легкогобетонных смесей;

- зависимости физико-механических и деформативных свойств легких бетонов от вида, размера и количества пористых заполнителей, результаты оптимизации составов бетона;

- результаты опытного апробирования результатов исследования.

Достоверность результатов работы обеспечивается проведением экспериментов на современном исследовательском оборудовании с достаточной воспроизводимостью результатов; применением стандартных методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов; статистической обработкой полученных данных с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний; сопоставлением результатов с аналогичными результатами, полученными другими авторами; положительными результатами опытного внедрения составов и технологии изготовления высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ДонНАСА (2011-2015 гг.), научных конференциях: III международная научно-техническая конференция по строительным материалам, конструкциям и сооружениям (Харьков, 2011); IX, X, XII международные научные конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Макеевка, 2010, 2011, 2013 гг.); The 11-th Conference of Science and Engineering of Oxide Materials "CONSILOX" (Bucharest, 2012); Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы физико-химического материаловедения" (Макеевка, 2013); Международная научная конференция "Эффективные композиты для архитектурной геоники" (Белгород, 2013); Международная конференция "Структурообразование, прочность и разрушение композиционных строительных материалов и конструкций" (Одесса, 2014); Международная научно-практическая конференция "Эффективные организационно-технологические решения и энергосберегающие технологии в строительстве" (Харьков, 2014); International Scientific Conference "Urban Civil Engineering and Municipal Facilities" (Saint-Petersburg, 2015); VII международный молодежный форум "Образование, наука, производство" (Белгород, 2015); Международная студенческая научно-практическая конференция "Строительство и архитектура-2015" (Ростов-на-Дону, 2015); VII Республиканская научно-практическая конференция "Современное строительство и архитектура: Энергосберегающие технологии" (Бендеры, 2015); VII региональная конференция "Комплексное использование природных ресурсов" (Донецк, 2015); Международная научно-практическая конференция "Строительство и архитектура-2015" (Ростов-на-Дону, 2015); Международная конференция "Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. Высококачественные бетоны: материалы, конструкции, технологии" (Макеевка, 2015).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 14 научных работах, в том числе 8 – в рецензируемых научных изданиях: шесть статей – в изданиях, входящих в перечень спе-

циализированных научных журналов, утвержденных МОН Украины; две статьи – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS; шесть публикаций – в материалах и тезисах конференций.

Общий объем публикаций – 7,32 п.л., из которых 4,2 п.л. принадлежат лично автору.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований в производство. Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрение результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые изложены в списке публикаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка используемых источников из 158 наименований на 16 страницах, четырех приложений, содержит 163 страниц, в том числе 117 страниц основного текста, 50 рисунков, 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, изложены научная новизна и практическое значение работы, приведена информация по структуре и объему диссертации, публикаций и апробации работы.

В первом разделе проанализировано современное состояние вопроса по направлению темы диссертации, изложены теоретические предпосылки исследований, на основе которых сформулирована научная гипотеза диссертационного исследования.

Исследования, выполненные научными школами под руководством Баженова Ю.М., Батракова В.Г., Бужевича Г.А., Горчакова Г.И., Дворкина Л.И., Довжика В.Г., Дорфа В.А., Житкевича Р.К., Звездова А.И., Иванова И.А., Макридина Н.И., Несветаева Г.В., Орендлихер Л.П., Попова Н.А., Симонова М.З., Спивака Н.Я., Фаликмана В.Р., Шорта А., Clarke, J.L., Craig, P., Dennis, W.S., Fergestad, S., Hoff, G.C., Holm, T.A., Kenneth, S., Yasar, E., Zhang, M.H. и др., позволили сформулировать основные предпосылки получения высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества. Согласно современным представлениям легкими высокопрочными принято считать бетоны в случае, когда выполняется условие: $f_{сж} / \rho_0 \geq 25$ (где $f_{сж}$ – прочность при сжатии, Н/мм²; ρ_0 – средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм³) – соотношение, которое, по сути, и определяет коэффициент конструктивного качества.

Для получения высокопрочных легких бетонов используют, как правило, те же технологические приемы, что и в технологии тяжелых высокопрочных бетонов: повышение прочности, плотности и жесткости матрицы растворной части за счет проектирования состава бетона с минимальным водоцементным отноше-

ем; повышенный расход вяжущего в сочетании с комплексом минеральных и химических добавок. В то же время, эти факторы обуславливают риск трещинообразования бетонов в раннем возрасте твердения вследствие развития усадочных деформаций, вызванных самовысушиванием бетона – аутогенной усадкой.

Отличительной особенностью легких бетонов является наличие пористого заполнителя, который ограничивает достижение прочности бетоном, сопоставимой с прочностью тяжелого бетона даже при повышенных расходах вяжущего. С другой стороны, более низкий модуль упругости пористого заполнителя и улучшенная контактная зона вокруг частиц вследствие их пористой поверхности способствует снижению концентрации напряжений между цементным камнем и заполнителем, что впоследствии уменьшает количество трещин в раннем возрасте бетона (Hoff G.C.). Однако, пористость заполнителя обуславливает проблемы с сохраняемостью подвижности бетонных смесей вследствие поглощения части воды затворения. Предварительное увлажнение заполнителя существенно усложняет технологию производства, зачастую приводит к снижению его прочности (Баженов Ю.М.), а введение дополнительного количества воды затворения непосредственно перед укладкой на строительном объекте, может существенно снижать прочность бетона – до 35% и больше (Retempering, ACI 116). Более рациональным представляется способ введения избыточного количества воды затворения с превышением исходной подвижности по отношению к заданной. В этом случае избыток воды затворения поглощается пористым заполнителем, не оказывая влияние на величину эффективного В/Ц отношения и не снижая прочности бетона.

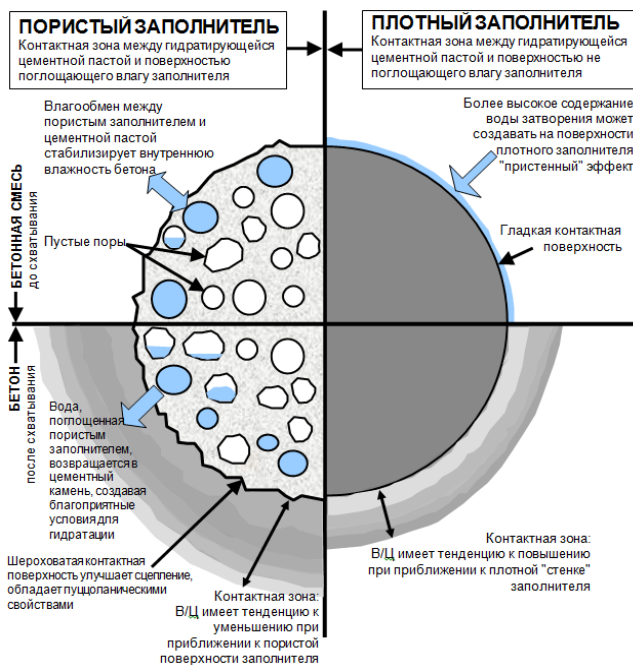


Рисунок 1 – Сравнительные характеристики контактной зоны с пористым и плотным заполнителями [Expanded Shale, Clay & Slate Institute, Salt Lake City, UT]

Рисунком 1 – Сравнительные характеристики контактной зоны с пористым и плотным заполнителями [Expanded Shale, Clay & Slate Institute, Salt Lake City, UT]

При этом, вода, поглощенная пористым заполнителем, в процессе твердения бетона будет служить источником внутреннего ухода, создавая предпосылки для формирования структуры с улучшенными механическими и деформационными характеристиками бетонов (рисунок 1). В литературе достаточно широко освещены вопросы, связанные с внутренним уходом тяжелого бетона (Ковлер К., Фаликман В.Р., Aïtcin P.C., Bentur A., Bentz D.P., Jensen O.M., Hansen P.F., Lura P., Powers T.C. и др.), в значительно меньшей мере – для конструкционного легкого бетона.

Для реализации концепции внутреннего ухода в высокопрочном тяжелом бетоне часть плотного заполнителя заменяется предварительно водонасыщенным пористым. Количество такого заполнителя рассчитывается исходя из показателя

теля контракции цементной пасты, содержания и степени гидратации вяжущего, а также адсорбционной способности заполнителя (Bentz D.P., Jensen O.M., Snyder K.A.). Поры последнего, как правило, больше, чем поры окружающей цементной пасты. В ходе гидратации цемента размер пор постоянно уменьшается, а развивающееся в них давление вследствие снижения внутренней влажности повышается, что способствует десорбции влаги из пор заполнителя. Однако, если вода не может перемещаться на большие расстояния (в плотной структуре цементной матрицы), необходим больший объем замены плотного заполнителя, чтобы обеспечить весь объем цементной пасты внутренним уходом (D. Bentz, R. Henkensiefken,).

В легких высокопрочных бетонах содержание пористых заполнителей намного больше, чем требуется для внутреннего ухода. С этой точки зрения можно предположить, что для обеспечения цементной пасты внутренним уходом нет необходимости производить предварительное увлажнение заполнителя до состояния полного водонасыщения, что, как отмечено выше, усложняет технологический процесс и снижает прочность заполнителя. В то же время, избыток воды затворения, который добавляется для компенсации потерь подвижности, должен быть адекватным и для внутреннего ухода, принимая во внимание тот факт, что водопоглощение заполнителя в цементной пасте ниже, чем в обычной воде, особенно при низких значениях В/Ц и наличии высокодисперсных активных минеральных добавок.

Таким образом, на основании анализа состояния вопроса и теоретических предпосылок исследования выдвинута следующая *научная гипотеза*. Высокопрочные легкие бетоны с повышенными коэффициентом конструктивного качества, а также деформационными характеристиками на основе рядовых пористых заполнителей (мелкозернистый керамзитовый гравий, щебень) могут быть получены при модифицировании цементной матрицы органо-минеральными добавками в сочетании с реализацией концепции внутреннего ухода.

Во втором разделе приведены свойства исходных материалов и изложены методы исследований. При проведении экспериментов в качестве исходных материалов приняты:

- вяжущее вещество: портландцемент (ПЦ) Балаклевского комбината СЕМ I-42,5 N (активность, $R_{ц}=525$ кгс/см²; нормальная густота, НГ=26%); Криворожского комбината СЕМ I-42,5 N ($R_{ц}=516$ кгс/см²; НГ=25%); Aalborg Rapid Cement СЕМ I-52,5 N ($R_{ц}=610$ кгс/см²; НГ=24,5%);

- мелкий заполнитель: песок кварцевый (П) Краснополянского месторождения (модуль крупности, $M_k=2,0$; насыпная плотность, $\rho_n=1458$ кг/м³); песок керамзитовый (ПК) ($M_k=3,5$; $\rho_n=462$ кг/м³);

- крупный заполнитель: Леса[®] (керамзит) фракции 4-8 мм (округлая форма зерен); гравий керамзитовый (ГК) Марганецкий фр.: 10-20 мм ($\rho_n=380$ кг/м³ – D400; водопоглощение по массе, $W_m^{24}=39\%$; прочность при сдавливании в цилиндре $R=1,68$ МПа – марка по прочности П75); 5-10 мм ($\rho_n=561$ кг/м³ – D600; сред-

ная плотность зерна – 1097 кг/м^3 ; $W_m^1=18,5\%$; $R=2,02 \text{ МПа}$ – П100); щебень керамзитовый (ЩК) фракции 5-10 мм ($\rho_n=415 \text{ кг/м}^3$ – D500; $W_m^{24}=47\%$; $R=1,52 \text{ МПа}$ – П75); щебень гранитный (ЩГ) фракции 5-10 мм ($\rho_n=1390 \text{ кг/м}^3$);

- химические модификаторы: суперпластификатор (СП) Sika Viscocrete-2300 HE; (водный раствор модифицированных поликарбоксилатов, плотность $1,08 \text{ кг/л}$); Dynamon SR-3 (водный раствор модифицированных полиакрилатов, $1,02 \text{ кг/л}$, содержание сухого вещества 30%); MELFLUX 5581 F "BASF" (сухой порошок на основе эфира поликарбоксилата модифицированного);

- минеральные добавки: микрокремнезем (МК) MAPEPLAST SF (содержание $\text{SiO}_2>85\%$; удельная поверхность, $S_{уд.}=25 \text{ м}^2/\text{г}$, $\rho_n=620 \text{ кг/м}^3$); микрокремнезем Elkem Microsilica Norway ($S_{уд.}=20 \text{ м}^2/\text{г}$, $\text{SiO}_2>88\%$); зольные микросферы (ЗМС) Старобешевской ТЭС ($\rho_n=340 \text{ кг/м}^3$); зола-унос (ЗУ) ТЭС ($\rho_n=964 \text{ кг/м}^3$).

Экспериментальные исследования выполнены с помощью стандартных и специальных методов. Технологические свойства бетонных смесей определяли в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-114-2002 "Бетонні суміші. Методи випробувань", а также согласно ACI 213 R "Guide for Structural Lightweight Concrete". Аутогенная усадка бетонов измерялась с помощью автоматизированного дилатометра конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена согласно методике ASTM C1698 "Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar"; измерение деформаций проводились с помощью электронного индикатора TRANS-ТЕК серии 305 с точностью до $0,003 \text{ мм}$. Внутренняя влажность образцов бетонов измерялась с помощью станции "Rotronic Hygroscope DT" датчиками температуры РТ-100 и влажности DMS-100. Показатели автоматически измерялись с интервалом 5 мин в течение всего периода твердения с точностью $\pm 1\%$. Исследования аутогенных деформаций и изменения внутренней влажности бетонов выполнены в Датском Техническом Университете в рамках научной стажировки под руководством заведующего кафедрой "Строительные материалы" профессора Оле М. Йенсена (Ole Mejlhede Jensen).

Контракцию цементных паст определяли объемным методом согласно ASTM C1608-07 "Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste". Рентгенофазовый анализ образцов цементного камня выполнен на установке "Дрон-4-07". Условия съемки дифрактограмм: медное излучение с длиной волны $\lambda=0,154178 \text{ нм}$ при ускоряющем напряжении 27 кВ и токе 15 мкА ; щель для съемки $0,5 \times 4 \times 0,25 \text{ мм}$. Съемка дифрактограмм осуществлялась в пошаговом режиме ($2\theta=10-80 \text{ град.}$ с шагом $0,1 \text{ град.}$ и временем экспозиции 5 с).

В третьем разделе исследованы составы и свойства легкогобетонных смесей и бетонов, полученных при частичной (полной) замене плотных заполнителей пористыми, а также влияние предварительного водонасыщения пористых заполнителей на свойства бетонных смесей и бетонов.

Исследовано влияние предварительного водонасыщения крупного пористого заполнителя – керамзитового гравия фракции 10-20 мм на прочностные характеристики конструкционного легкого бетона, состав которого представлен в таб-

лице 1, а также сохраняемость подвижности легковесных смесей в течение 90 мин.

Таблица 1 – Состав и свойства свежеприготовленной бетонной смеси

№	Расход материалов, кг/м ³								Свойства бетонной смеси	
	ПЦ	МК	ЗУ	П	ГК	СП, л	В, л	В/В	средняя плотность, кг/м ³	начальная подвижность, см
1	576	101	80	221	318	6,7	218*	0,33**	1521	7,0
2	576	101	80	221	318	6,7	257	0,38	1580	4,2

Примечания: *- расход воды затворения без учета количества воды, содержащейся в порах заполнителя; **- водовязующее отношение (В/(ПЦ+МК)) без учета количества воды, содержащейся в порах заполнителя.

Бетонная смесь с предварительно водонасыщенным керамзитом (состав 1) в процессе выдержки после приготовления имеет ярко выраженную тенденцию к повышению подвижности (рисунок 2 а). Максимальное значение осадки конуса – 20 см, достигается после 60 минут выдержки смеси, в дальнейшем происходит незначительное снижение, в то же время в пределах 90 мин. бетонная смесь сохраняет показатели подвижности, соответствующие марке по удобоукладываемости П4. При этом пористый заполнитель не поглощает из смеси воду затворения, а, скорее, отдает из наиболее крупных пор, повышая при этом В/Ц смеси. С другой стороны, в случае применения керамзита в состоянии естественной влажности, при значении водовязующего отношения 0,38 достигается начальная подвижность бетонной смеси лишь 4 см – П1. При этом в процессе выдержки наблюдается резкая потеря подвижности – в пределах 90 мин. до 0,4 см, что связано с интенсивным поглощением влаги пористым заполнителем.

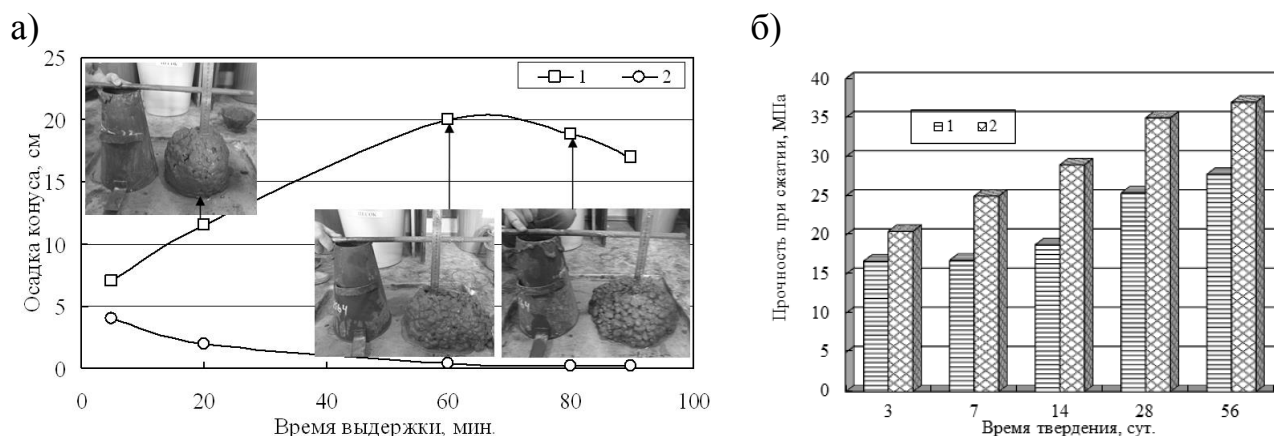


Рисунок 2 – Изменение подвижности бетонных смесей в процессе выдерживания (а) и кинетика роста предела прочности при сжатии легкого бетона (б)

Относительно прочностных показателей легкого бетона следует отметить, что предел прочности при сжатии бетона состава 2 во все сроки твердения, выше, чем бетона состава 1 (рисунок 2 б). Несмотря на то, что расчетное значение водо-

вяжущего отношения бетона состава 1 на 13% меньше, чем состава 2, его фактическое значение с учетом влаги, которая судя по показателям изменения подвижности десорбируется из крупных пор керамзита уже в процессе перемешивания смеси, выше. Снижение прочности обусловлено также существенным уменьшением коэффициента размягчения керамзита в состоянии полного водонасыщения, что подтверждается характером разрушения образцов бетона.

Средняя плотность бетона состава 2 в высушенном состоянии составляет $1,48 \text{ кг/дм}^3$, таким образом, условие для высокопрочного бетона $f_{сж} / \rho_0 \geq 25$ на минимальном пределе достигается лишь к 56 суткам твердения. Это свидетельствует о том, что в модифицированном легком бетоне рядовой крупный пористый заполнитель ограничивает возможности повышения коэффициента конструктивного качества ("слабое звено"), а его предварительное водонасыщение в еще больше мере отрицательно сказывается на прочности бетона.

В дальнейших исследованиях приняты составы бетона с максимальной крупностью зерен 10 мм. Состав заполнителей представлен керамзитовым песком и зольными сферами в качестве частичной / полной замены плотного кварцевого песка и керамзитовым гравием / щебнем фракции 5-10 мм в качестве частичной / полной замена гранитного щебня. В качестве активной минеральной добавки использован микрокремнезем в количестве 10% от расхода цемента, содержание суперпластификатора принято постоянным – 0,7% от расхода цемента, величина водоцементного и водовязущего отношения – 0,37 и 0,33, соответственно. За контрольный принят состав высокопрочного бетона на основе заполнителей в виде гранитного щебня фракции 5-10 мм и кварцевого песка. Проводилась пошаговая замена плотных заполнителей пористыми каждого вида с диапазоном 25% по объему до полной замены. В результате были получены 16 составов бетона.

Из массива полученных данных выделены составы, характеризующиеся наибольшими показателями прочности при сжатии при наименьшей средней плотности бетона – состав 2 (50% замена плотного кварцевого песка керамзитовым; 25% щебня гранитного – керамзитовым); состав 3 – (50% замена плотного кварцевого зольными сферами; 25% щебня гранитного – керамзитовым) (таблица 2).

Таблица 2 – Состав и свойства бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг/м ³									Свойства бетонной смеси	
	ПЦ	МК	П	В	ЩГ	ЩК	ЗМС	ПК	СП	средняя плотность, кг/м ³	D _{расп} , мм
1	612	61	788	224	687	0	-	-	4,3	2353	540
2	612	61	394	224	515	59	-	163	4,3	1924	500
3	612	61	394	224	515	59	94	-	4,3	1892	530

При частичной замене плотных заполнителей пористыми получены бетоны с пределом прочности при сжатии 59,4 и 52,3 МПа и средней плотностью в сухом состоянии 1869 и 1823 кг/м³ (рисунок 3 а, б), коэффициент конструктивного качества составляет при этом ККК=31-28.

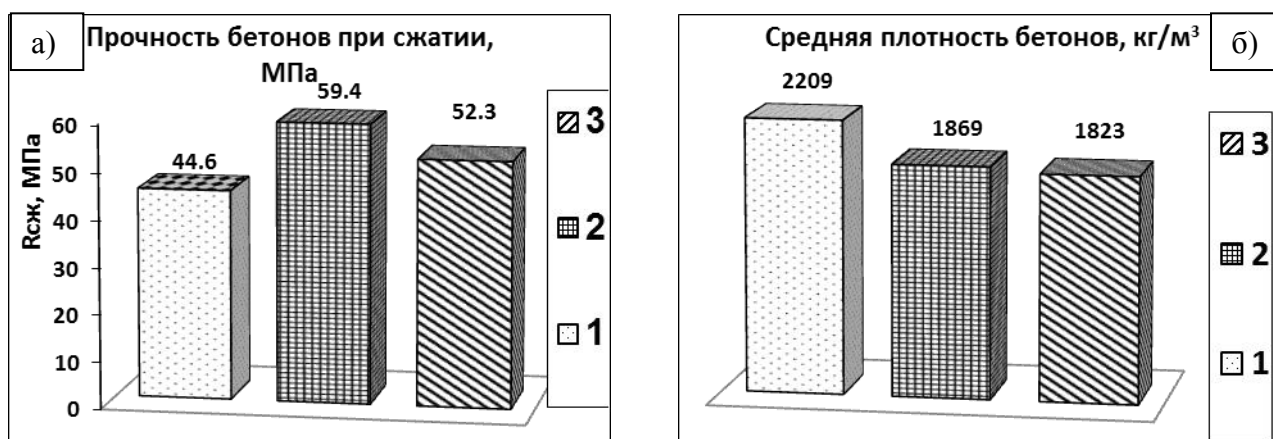


Рисунок 3 – Предел прочности при сжатии (а) и средняя плотность (б) бетонов составов 1, 2, 3 (таблица 2)

Более высокие значения предела прочности при сжатии бетонов с керамзитовым песком по сравнению с контрольным составом, вероятно, можно объяснить уменьшением эффективного водоцементного отношения вследствие поглощения пористым заполнителем части воды затворения, которая в дальнейшем становится доступной для гидратации цемента.

Бетонные смеси с заменой кварцевого песка керамзитовым характеризуются высокой начальной подвижностью (текучестью), по показателю расплыва конуса близкой к самоуплотняющимся, однако она уменьшается в процессе выдерживания бетонной смеси. Потеря подвижности связана, в первую очередь, с поглощением воды затворения пористым заполнителем. С другой стороны, прогрессирующая гидратация цемента, формирование новообразований с очень высокой удельной поверхностью и адсорбция на них суперпластификатора также способствуют потере подвижности. При этом крайне сложно выделить "вклад" каждого из перечисленных факторов, а также прогнозировать величину водопоглощения заполнителя в твердеющей цементной пасте для расчета количества воды, которое необходимо добавить в бетонную смесь для компенсации потери подвижности. Для решения этой задачи разработана методика, заключающаяся в следующем. На первом этапе была приготовлена бетонная смесь состава 2 (таблица 2), в которую введена добавка-замедлитель твердения – сульфат меди (СМ, 0,05% от массы цемента). В процессе выдерживания готовой бетонной смеси в течение 120 мин. определяли ее подвижность с интервалом 15 мин. Наиболее интенсивно потери подвижности происходят в первые 30 минут и практически стабилизируются к 120 минутам (рисунок 4). При этом, можно утверждать, что в этом случае потери подвижности обусловлены лишь поглощением воды пористым заполнителем.

На втором этапе были определены показатели водопоглощения керамзита в водопроводной воде, величина которого в течение 120 минут составляет 22% по массе (рисунок 4). Для определения водопоглощения керамзита в цементной пасте использована методика определения контракции (химической усадки) цементной пасты согласно ASTM C 1608-07. В предварительно взвешенную стеклянную колбу помещали цементную пасту, идентичную по содержанию компо-

нентов бетонной смеси состава 2, с соответствующей порцией керамзитового песка фракции 0,315-1,25 мм (таблица 3). После взвешивания колбу заливали дистиллированной водой, плотно закрывали резиновой пробкой со вставленным мерным капилляром (рисунок 5). Массу керамзита в колбе уточняли после окончания эксперимента путем промывки исследуемой пробы на сите №0,315 мм, с последующим высушиванием и взвешиванием. Образец "микробетона" (состав 1) с добавкой замедлителя твердения интенсивно поглощает воду в течение 120 минут с последующей стабилизацией к 240 минутам (рисунок 6), в то время как аналогичный состав 2 без добавки продолжает интенсивно поглощать воду и после 240 минут еще в течение нескольких суток, что связано уже непосредственно с контракцией цемента. На основании эксперимента установлено, что величина водопоглощения керамзитового песка в цементном тесте, модифицированном органико-минеральными добавками, составляет 9,8% – 47% от величины водопоглощения в обычной воде за аналогичный промежуток времени.

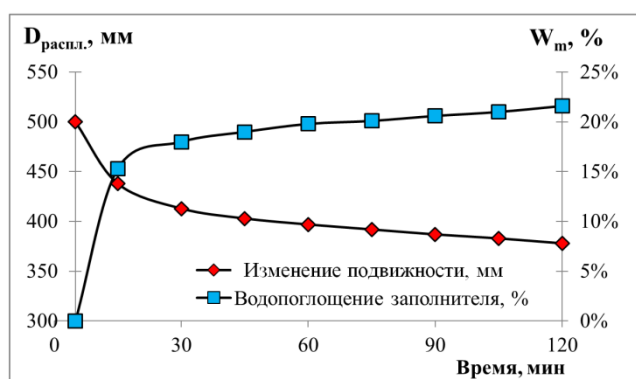


Рисунок 4 – Изменение подвижности бетонной смеси с замедлителем твердения и кинетика водопоглощения керамзита в воде



Рисунок 5 – Схема эксперимента по определению контракции цементной пасты (водопоглощения керамзита в цементной пасте)

Таблица 3 – Состав цементных паст с керамзитовым песком ("микробетон")

№	Содержание компонентов, г					
	ПЦ	МК	ПК	СП	СМ	В/В*
1	100	10	35	0,7	0,05	0,33
2	100	10	35	0,7	-	0,33

*Примечание: $V/V = V/(ПЦ + МК)$

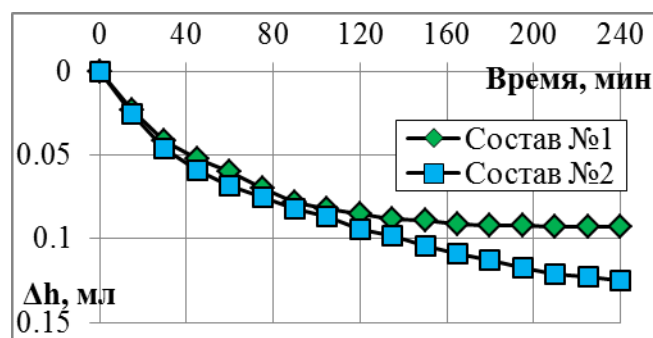


Рисунок 6 – Изменение высоты водяного столбика в капилляре в процессе твердения цементных систем

При реализации на практике способа введения дополнительного количества воды затворения с целью сохранения подвижности бетонной смеси необходимо учитывать свойства пористых заполнителей (среднюю плотность, пористость, кинетику водопоглощения). Для исследования влияния дополнительной воды за-

творения на физико-механические свойства легкого бетона было приготовлено четыре состава бетонных смесей с одинаковым расчетным значением В/Ц и различным дополнительным количеством воды затворения – 10, 15 и 25% от массы керамзитового гравия Леса фракции 4-8 мм (таблица 4).

Таблица 4 – Состав легкобетонных смесей

№	Состав смеси	Расход компонентов, кг/м ³							Средняя плотность смеси, кг/м ³
		ПЦ	МК	В	В ⁺	П	ГК	СП	
1	ГК 4-8 мм	667	100	159	0	467	300	8	1887
2	ГК 4-8 мм +10% воды	667	100	159	16	467	300	8	1889
3	ГК 4-8 мм +15% воды	667	100	159	24	467	300	8	1894
4	ГК 4-8 мм +25% воды	667	100	159	40	467	300	8	1897

Наибольшее значение предела прочности при сжатии получено при введении 10% дополнительной воды затворения – 48,6 МПа, что на 23,6% больше, чем бетона контрольного состава ($R_{сж}=39,3$ МПа). Дальнейшее увеличение дополнительного количества воды приводит к снижению прочности бетонов при сжатии (рисунок 7 а). Показатели средней плотности легких бетонов находятся в пределах от 1833 до 1887 кг/м³ (рисунок 7 б), коэффициент конструктивного качества составляет $KKK=25,7-29,7$.

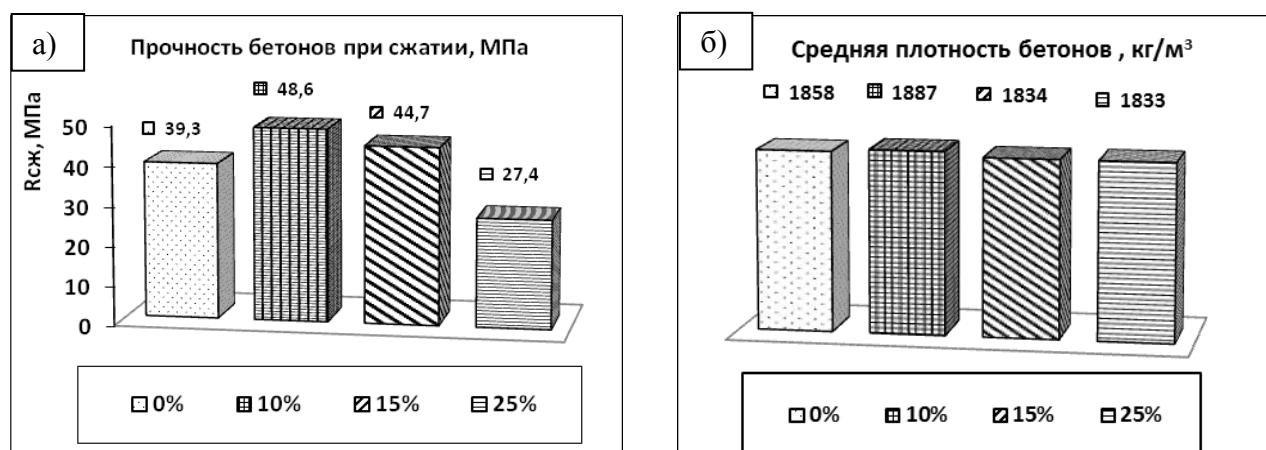


Рисунок 7 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) легких бетонов в зависимости от количества дополнительной воды затворения

Четвертый раздел посвящен изучению физико-механических и деформационных свойств высокопрочных легких бетонов.

При исследовании деформационных свойств бетона за базовый принят состав бетона № 1 (таблица 4). Согласно исследованиям Bentz D.P. и Snyder K.A. количество дополнительной воды, необходимое для обеспечения внутреннего ухода для бетона с В/Ц менее 0,4, можно рассчитать по формуле:

$$V_b = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\max}}{\rho}, \quad (1)$$

где C_f , кг/м³ – содержание цемента, CS (0,06 кг воды на 1 кг цемента) – контракция (химическая усадка) цемента, α_{\max} – прогнозируемая максимальная степень

гидратации (0-1), ρ – плотность воды (1000 кг/м^3). Для бетонов с В/Ц отношением менее 0,40 (высокопрочные бетоны), полная гидратация не достигается, и максимальная степень гидратации может быть определена по формуле $(w/c)/0,40$.

В соответствии с уравнением (1), объем дополнительной воды составляет $0,025 \text{ м}^3$ – 15% от исходного содержания воды затворения или 8,3% от массы сухого керамзита. Таким образом, требуемое содержание дополнительной воды затворения для внутреннего ухода за бетоном не превышает величину водопоглощения керамзита в цементном тесте 9,8% (раздел 3). Для исследований приготовлено четыре состава бетонов (таблица 5).

Таблица 5 – Состав бетонных смесей

№	Состояние гравия керамзитового	Содержание компонентов, кг/м^3						
		ПЦ	МК	П	В	ГК	СП, л	Воздух, %
1	ГК 0%	1113	167	779	250	0	13,4	4,5
2	ГК 40% (водонасыщенный)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
3	ГК 40% (сухой, гидрофобизированная поверхность)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
4	ГК 40% (сухой+15% доп. воды)	667	100	467	159 +25	300	8,0	4,3

Показатель подвижности бетонных смесей и потерю ее во времени исследовали в течение 60 минут после смешивания компонентов. Бетонная смесь с предварительно водонасыщенным пористым заполнителем характеризуется минимальными потерями подвижности – 7%. В то же время этот показатель для бетонной смеси с сухим керамзитом и дополнительным содержанием воды затворения выше – 24%, т.е. объем воды, необходимый для внутреннего ухода бетона не в полной мере компенсирует снижение подвижности бетонной смеси.

Аутогенную усадку цементного камня и бетона, а также изменение внутренней влажности твердеющих бетонов исследовали с использованием автоматизированного дилатометра конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена и станции "Rotronic Hygroscope DT", соответственно. Установлено, что значительное увеличение аутогенной усадки (АУ) бетона состава 1 (цементно-песчаный раствор) приходится на время твердения системы от 5 до 24 часов, когда деформации достигают значения -2200 мкм (рисунок 8). В этот же период твердения наблюдается снижение величины внутренней влажности (ВВ) системы от 100 до 93% (рисунок 9). В возрасте 14 суток величина внутренней влажности цементной системы достигает значения 80%. При этом аутогенная усадка раствора увеличивается до -2600 мкм.

При введении в раствор керамзитового гравия в начальный период твердения (48 час.) происходит небольшое расширение системы, с последующим развитием усадочных деформаций в составах бетона 3 и 4 (рисунок 10). В то же время, при использовании предварительно водонасыщенного пористого заполнителя (состав 2) вплоть до 14 суток наблюдается расширение системы. В этот период бетон сохраняет значение внутренней влажности в пределах 97-96,6% (рисунок 11).

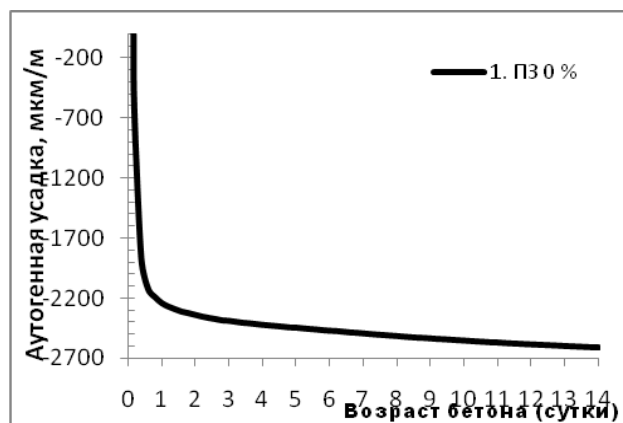


Рисунок 8 – Изменение аутогенной усадки бетона в процессе твердения

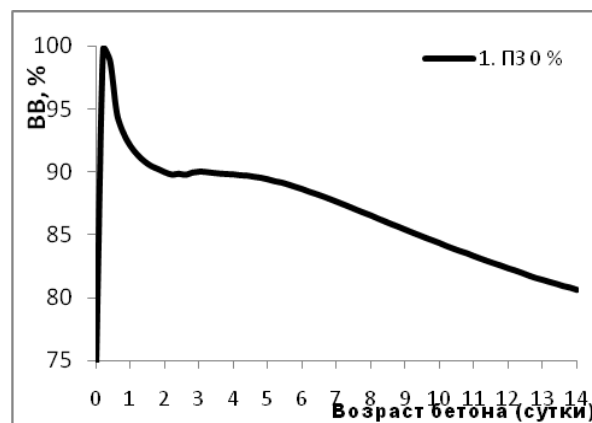


Рисунок 9 – Изменение внутренней влажности бетона в процессе твердения

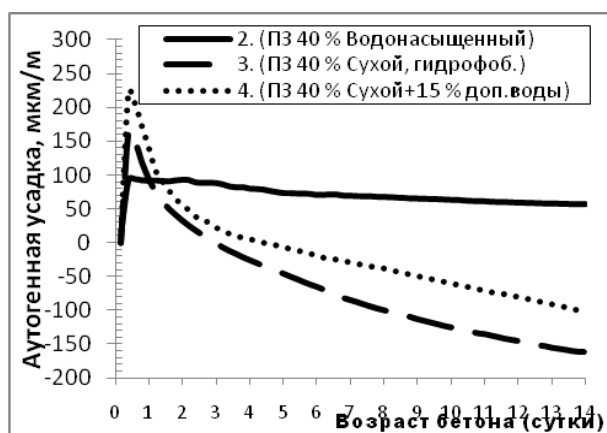


Рисунок 10 – Изменение аутогенной усадки легкого бетона в процессе твердения

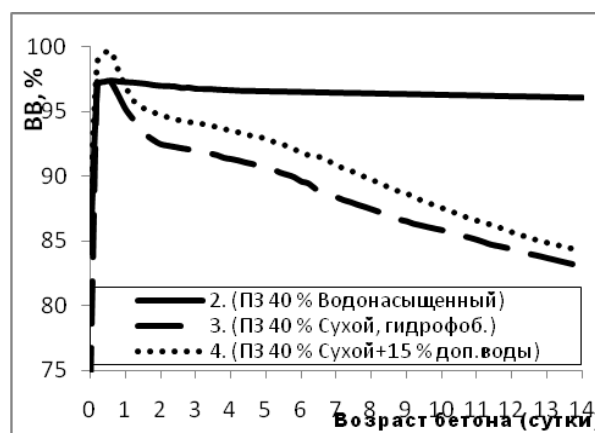


Рисунок 11 – Изменение внутренней влажности легкого бетона в процессе твердения

Для бетонов составов 3, 4 аутогенная усадка достигает значения -160×10^{-6} и -100×10^{-6} м, соответственно. Постепенный рост аутогенной усадки с 3 по 14 суток твердения сопровождается уменьшением значений внутренней влажности бетонов в пределах от 93-95% до 81-83%. Гидрофобизация поверхности керамзитового гравия не устраняет проблемы развития аутогенной усадки. С другой стороны, введение дополнительной воды затворения также не решает полностью эту проблему, однако значение аутогенной усадки -100×10^{-6} не является критичным для развития раннего трещинообразования, вероятность которого является наибольшей, когда отношение усадочных напряжений к пределу прочности при растяжении цементного камня достигает максимума.

Частичная замена раствора (состав 1) пористым заполнителем значительно снижает показатели предела прочности при сжатии. Наибольшее значение предела прочности при сжатии легкого бетона наблюдается при введении предварительно водонасыщенного пористого заполнителя. Легкий бетон с дополнительной водой затворения характеризуется практически таким же значением проектной прочности, но более высоким показателем в раннем возрасте твердения (рисунок 12).

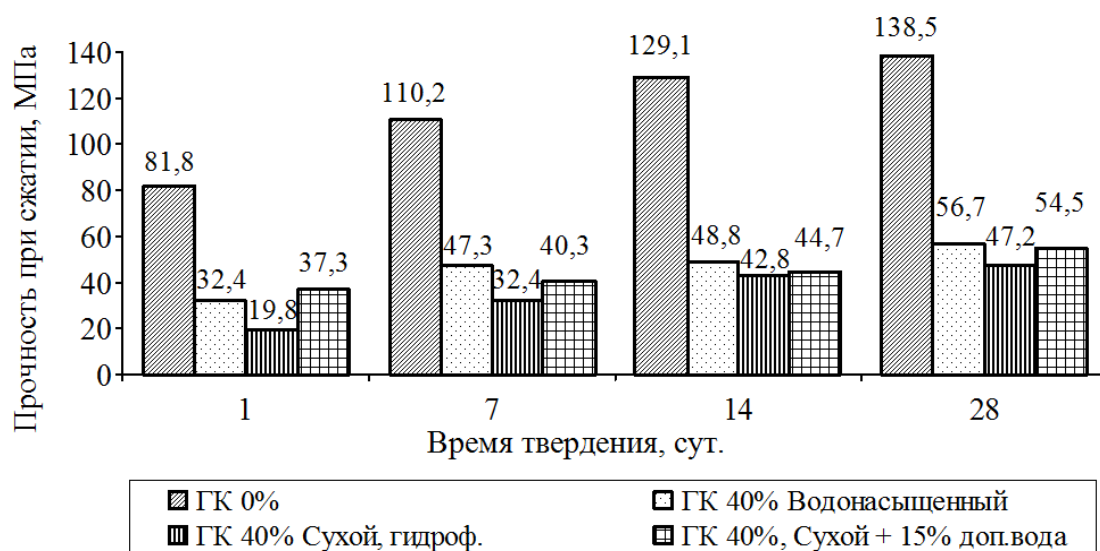


Рисунок 12 – Кинетика роста предела прочности при сжатии бетонов

По данным РФА проб цементного камня, отобранных после механических испытаний бетона, установлена более высокая степень гидратации образцов с внутренним уходом бетона (предварительно водонасыщенный керамзит или введение дополнительного количества воды затворения). Это иллюстрируется более низкой интенсивностью дифракционных отражений алита ($d=0,280$; $0,277$; $0,232$; $0,183$; $0,154$ нм) наряду с повышенной интенсивностью линий гидросиликатов кальция ($d=0,301$; $0,247$; $0,208$ нм) в сравнении с образцом без внутреннего ухода (сухой керамзит).

На официальной странице Американского института стандартов NIST (<http://concrete.nist.gov>) в онлайн режиме была построена 2D модель распределения пористых и плотных заполнителей в бетоне. Показано, что дополнительная

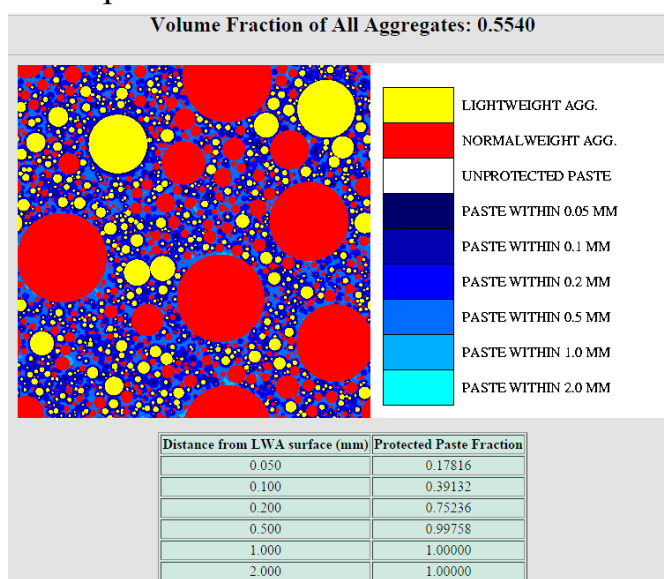


Рисунок 13 – 2D модель распределения пористых и плотных заполнителей в бетоне и зон внутреннего ухода в бетоне

вода затворения, обеспечивая, как минимум, водосодержание пористого заполнителя 9,8%, и его распределение в бетоне, создают благоприятные условия для более полной гидратации вяжущего во всем объеме бетона, уменьшая при этом внутренние напряжения, вызванные аутогенной усадкой (рисунок 13).

Для исследования влияния дополнительной воды затворения, необходимой для внутреннего ухода, на показатели влажностной усадки, а также механические и деформационные свойства бетонов в условиях кратковременного нагружения были изготовлены составы легких кон-

струкционных бетонов с частичной (25%) заменой крупного плотного заполнителя (щебня) – пористым (керамзитовым щебнем), и частичной (50%) заменой мелкого плотного заполнителя (кварцевого песка) – керамзитовым песком (составы 1, 2) или зольными микросферами (3) (таблица 6).

Таблица 6 – Состав и свойства бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг/м ³										Свойства бетонной смеси	
	ПЩ	МК	П	ЩГ	В	В ⁺	ЩК	ЗМС	ПК	СП	ρ_0 , кг/м ³	D _{расп} , мм
1	612	61	394	515	224	0	59	-	163	4,3	1924	500
2						24,5		-	163		1931	530
3						0		94	0		1892	550

Средние значения прочности бетона для трех составов в возрасте 28 сут. имеют значения: $f_{lck, cube1} = 50,3$ МПа; $f_{lck, cube2} = 59,4$ МПа; $f_{lck, cube3} = 52,3$ МПа. Средние значения призмной R_b прочности составляют соответственно 41,8; 49,9 и 45,4 МПа. Средние значения величины начального модуля упругости в возрасте 210 сут. составляют – $E_{lcm1} = 33,7 \times 10^3$, $E_{lcm2} = 36,8 \times 10^3$, $E_{lcm3} = 34,1 \times 10^3$ МПа. Предельная сжимаемость при кратковременных испытаниях составляет соответственно: $\bar{\epsilon}_{b1} = 172 \cdot 10^{-5}$; $\bar{\epsilon}_{b2} = 188 \cdot 10^{-5}$; $\bar{\epsilon}_{b3} = 189 \cdot 10^{-5}$; деформации усадки при высыхании в возрасте 210 сут.: $\bar{\epsilon}_{lcd1} = 34,8 \cdot 10^{-5}$, $\bar{\epsilon}_{lcd2} = 22,8 \cdot 10^{-5}$ и $\bar{\epsilon}_{lcd3} = 55,8 \cdot 10^{-5}$.

При введении дополнительной воды затворения (состав 2), необходимой для внутреннего ухода, деформации усадки при высушивании в возрасте 210 суток твердения на 35% меньше, чем контрольного образца (состав 1). При введении зольных микросфер в качестве частичной замены плотного кварцевого песка (состав 3) усадка при высыхании бетона на 38% выше, чем контрольного состава 1, и на 59% выше состава бетона 2 с внутренним уходом.

В пятом разделе представлены результаты опытно-промышленной апробации результатов исследования. На основании разработанного "Технологического регламента производства высокопрочных легких бетонов" (ООО "Донспецпром", г. Макеевка), предложены конструктивные решения элементов зданий и сооружений с заменой традиционного тяжелого бетона высокопрочным легким.

Выполнен сравнительный анализ вариантов конструктивных решений наружной стены и перекрытия из тяжелого (I) и легкого конструкционного бетона (II) для жилого дома с конструктивной схемой серии 87, которые отвечают современным требованиям строительства по показателям энергоэффективности ($R'_{\Sigma np} = 3,45$ и $R''_{\Sigma np} = 3,45$ м²·К/Вт при $r^I = 1,02$ и $r^{II} = 1,01$, соответственно). При этом конструктивное решение наружной стены с несущим слоем и перекрытием из монолитного легкого бетона позволяет уменьшить толщину стены на 21% (ООО "Архионика", г. Таганрог, 2016 г.).

Определено влияние средней плотности и прочности бетона на коэффициент армирования железобетонной плиты проезжей части автодорожного моста при проектировании (реконструкции). Отмечен эффект снижения расхода арматурной стали в пролетных строениях при использовании бетонов со средней

плотностью в интервале 1800-2000 кг/м³. При этом эффект использования высокопрочного легкого бетона повышается с увеличением длины пролета, что свидетельствует о целесообразности использования высокопрочного легкого бетона при строительстве большепролетных сооружений.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально обосновано решение важной народно-хозяйственной задачи повышения эффективности зданий и сооружений за счет снижения материалоемкости, уменьшения массы строительных конструкций, улучшения их теплотехнических характеристик при применении легких бетонов с повышенными коэффициентом конструктивного качества и деформационными свойствами.

2. Установлено, что предварительное увлажнение крупного пористого заполнителя до состояния полного водонасыщения приводит к росту начальной подвижности легкогобетонной смеси, что в дальнейшем обеспечивает практически неизменную подвижность в течение 90 минут выдерживания ($\Delta П \leq 15\%$), однако при этом наблюдается снижение предела прочности бетона при сжатии, что связано с повышением величины эффективного водоцементного отношения и снижением коэффициента размягчения керамзитового гравия.

3. Разработаны составы высокопрочных легких бетонов по критерию коэффициента конструктивного качества: при частичной замене плотных заполнителей пористыми (50% по объему плотного кварцевого песка керамзитовым / зольными сферами; 25% щебня гранитного – керамзитовым) получены бетоны с пределом прочности при сжатии 59,4/52,3 МПа, средней плотностью 1869/1834 кг/м³, коэффициентом конструктивного качества ККК=31/28.

4. Установлено, что величина водопоглощения керамзита (марка D500) в водопроводной воде в течение 120 минут составляет 22% по массе, в то время как в цементной пасте, модифицированной органо-минеральными добавками и идентичной по составу легкогобетонной смеси – 9,8% (47% от водопоглощения в обычной воде). При этом водопоглощение в цементной пасте наиболее интенсивно происходит в течение первых 30 минут, что подтверждается испытаниями подвижности бетонной смеси, содержащей сильный замедлитель твердения – сульфат меди.

5. В соответствии с полученными экспериментальными данными контракции цементной пасты, модифицированной добавками суперпластификатора и микрокремнезема, выполнен расчет объема дополнительной воды затворения, необходимый для обеспечения внутреннего ухода за бетоном с В/Ц менее 0,4 – 15% от исходного содержания воды затворения или 8,3% от массы сухого керамзита, что не превышает величину водопоглощения керамзита в цементном тесте.

6. Установлено, что введение дополнительной воды затворения позволяет минимизировать аутогенную (собственную) усадку легкого бетона до величины $\varepsilon_{ca} = -100 \times 10^{-6}$, которая не является критичной для развития раннего трещинообразования. Это обеспечивается внутренним уходом с поддержанием влажности не

менее 90% в первые семь суток твердения. Согласно компьютерному 2D-моделированию распределения водонасыщенных пористых заполнителей в структуре бетона (Internal Curing Web Site: <http://concrete.nist.gov>) показано, что весь объем цементной пасты обеспечен надлежащим внутренним уходом.

7. Показано, что внутренний уход за бетоном, реализуемый через введение расчетного объема дополнительной воды затворения, обеспечивает повышение механических и деформативных свойств легкого бетона: предела прочности при сжатии, $f_{ck, cube28}$, на 18,1%; призмочной прочности, R_b , – на 19,4%; начального модуля упругости, E_{cm1} , в возрасте 210 сут. – на 9,2%. Деформации усадки при высыхании, ε_{ld} , в возрасте 210 сут. на 35% меньше, чем контрольного образца. В то же время, объем воды, требуемый для внутреннего ухода, не устраняет в полной мере проблему потерь подвижности бетонной смеси в процессе выдерживания.

8. На основе нормативных документов в области конструкционных легких бетонов (ACI 213R-03 "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete"; EN 206-1:2010 "Бетон – Часть 1: Общие технические требования, производство и контроль качества") разработан "Технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов". Выполнен расчет технико-экономической эффективности применения высокопрочного легкого бетона в конструкциях зданий и сооружений.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Зайченко, Н.М. Внутренний уход и аутогенная усадка высокопрочных бетонов [Текст] / Н.М. Зайченко, **С.В. Лахтарина** // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 122. – С. 236-244. (*Получены экспериментальные данные по внутреннему уходу и аутогенной усадке высокопрочных бетонов*).

2. Зайченко, Н.М. Самоуплотняющиеся бетоны, дисперсноармированные полимерными волокнами [Текст] / Н.М. Зайченко, **С.В. Лахтарина** // Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 63-70 (*Исследование подвижности бетонных смесей*).

3. Зайченко, Н.М. Конструкционный легкий бетон с повышенным коэффициентом конструктивного качества для монолитного домостроения [Текст] / Н.М. Зайченко, Г.Х. Паничаров, **С.В. Лахтарина** // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012-1(93). – С. 165-171 (*Разработка составов конструкционных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества, исследование физико-механических свойств*).

4. **Лахтарина, С.В.** Влияние дополнительного количества воды затворения для восстановления подвижности бетонных смесей на среднюю плотность и прочность конструкционных легких бетонов [Текст] / С.В. Лахтарина, Н.М. Зайченко // Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2013. – Вип. 25. – С. 103-110

(Проведение экспериментальных исследований физико-механических свойств легких бетонов).

5. **Лахтарина, С.В.** Влияние частичной замены плотных заполнителей пористыми на среднюю плотность и прочность бетонов [Текст] / С.В. Лахтарина, Н.М. Зайченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури // Одеса. – 2014. – Вип. 52. – С. 151-160. (*Разработка составов бетонов, исследование физико-механических свойств*).

6. **Лахтарина, С.В.** Мелкозернистые бетоны с повышенными физико-механическими свойствами / С.В. Лахтарина [Текст] // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2014. – № 58. – С. 210-217.

– публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:

1. Zaichenko, M. Portland-composite cements modified by electrical agglomeration / M. Zaichenko, **S. Lakhtaryna** [Текст] // Romanian Journal of Materials. – 2013. – Vol. 43, No 3. – P. 326-331 (*Проведение экспериментальных исследований пуццолановой активности минеральных добавок*).

2. Zaichenko, M. The influence of extra mixing water on the properties of structural lightweight aggregate concrete [Текст] / M. Zaichenko, **S. Lakhtaryna**, A. Korsun // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 117. – P. 1036-1042 (*Экспериментальные исследования аутогенной усадки и внутренней влажности конструкционных легких бетонов*).

– публикации в материалах и тезисах конференций:

1. Zagoruyko, T.I. Autogenous shrinkage of high performance concrete / T.I. Zagoruyko, **S.V. Lakhtarina** // Мат-ли IX Міжн. наук. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів "Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій": Макіївка, 22 квітня 2010. – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2010. – С.87 (*Анализ деформационных характеристик высокопрочных бетонов в раннем возрасте*).

2. Лобода, Е.С. Высококачественные модифицированные бетоны с компенсированной усадкой / Е.С. Лобода, **С.В. Лахтарина**, Ал-Маршди Косай // Строительство и архитектура – 2015. Часть 1: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства: мат-лы Междун. науч.-практ. конф.: тезисы докладов. – Ростов н/Д: Ростовский государственный строительный ун-т, 2015. – С. 131-134 (*Исследование деформационных свойств легких высокопрочных бетонов*).

3. Зайченко, Н.М. Конструкционные легкие бетоны с высоким коэффициентом конструктивного качества / Н.М. Зайченко, В.Г. Вешневская, **С.В. Лахтарина** // Строительство и Архитектура-2015 – Том 2: мат-лы междун. научно-практ. конф. ФГБОУ ВПО "Ростовский государственный строительный ун-т", 2015. –

С. 486-489 (*Разработка составов конструкционных легких бетонов, исследование физико-механических свойств*).

4. Мартынова, В.Б. Оценка энергоэффективности наружной стены жилого дома, выполненной кладкой из ячеистых блоков в сопряжении с железобетонной колонной / В.Б. Мартынова, А.А. Куценкова, **С.В. Лахтарина** // Современное строительство и архитектура: Энергосберегающие технологии: Сб. мат-ов VII Республиканской научно-практ. конф.: 12 ноября 2015 г. – Бендеры, 2015. – С. 20-24 (*Исследование теплофизических свойств бетонов*).

5. Zaichenko, N. Portland-composite cements modified by electrical agglomeration / N. Zaichenko, **S. Lakhtaryna** // Proceedings of the Intern. conf. "Consilox-2012", 13-15 October 2012. – Bucharest, 2012. – P. 64. (*Экспериментальные исследования*).

6. **Лахтарина, С.В.** Легкие бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества / С.В. Лахтарина, Н.М. Зайченко // Материалы научно-практической конференции "Эффективные организационно-технологические решения и энергосберегающие технологии в строительстве" (23-24 апреля 2014 г). – Харьков: ХНУБА, ХОТБ АБУ, 2014.–С. 100-101.

АННОТАЦИЯ

Лахтарина Сергей Викторович. Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" МОН ДНР, Макеевка, 2016.

В диссертации разработаны составы легких высокопрочных бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества, применение которых обеспечивает снижение материалоемкости зданий и сооружений, трудоемкости процессов строительного производства, повышение энергоэффективности зданий.

Выполнена оптимизация составов легких высокопрочных бетонов по критерию коэффициента конструктивного качества: при частичной замене плотных заполнителей пористыми (50% по объему плотного кварцевого песка керамзитовым / зольными сферами; 25% щебня гранитного – керамзитовым) получены бетоны с пределом прочности при сжатии 59,4/52,3 МПа, средней плотностью 1869/1823 кг/м³, коэффициентом конструктивного качества ККК=31/28.

Выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование получения высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества и улучшенными деформативными характеристиками на основе установления закономерностей влияния органо-минеральных модификаторов и концепции внутреннего ухода на процессы формирования структуры и свойств бетона.

Определено фактическое значение водопоглощения керамзитового гравия в цементной пасте с добавкой органо-минеральных модификаторов, идентичной по составу легкогобетонной смеси, которое составляет 47% от водопоглощения в

обычной воде, при этом водопоглощение в цементной пасте наиболее интенсивно происходит в течение первых 30 минут.

По данным рентгенофазового и термогравиметрического анализов установлено, что внутренний уход за бетоном обеспечивает более высокую степень гидратации цементного камня, что иллюстрируется снижением интенсивностей дифракционных отражений алита ($d=0,277; 0,232; 0,183; 0,154$ нм) и повышением интенсивности линий гидросиликатов кальция ($d=0,301; 0,247; 0,208$ нм) в сравнении с образцами без внутреннего ухода.

Установлено, что внутренний уход за бетоном, реализуемый через введение расчетного объема дополнительной воды затворения, позволяет минимизировать аутогенную (собственную) усадку легкого бетона до величины $\varepsilon_{lca} = -100 \times 10^{-6}$, снизить на 35% усадку при высыхании, повысить прочность и модуль упругости бетона; компьютерное 2D-моделирование распределения водонасыщенных пористых заполнителей в структуре бетона свидетельствует о том, что весь объем цементной пасты обеспечен надлежащим внутренним уходом.

На основе нормативных документов в области конструкционных легких бетонов (ACI 213R-03 "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete"; EN 206-1:2010 "Бетон – Часть 1: Общие технические требования, производство и контроль качества") разработан "Технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов". Выполнен расчет технико-экономической эффективности применения высокопрочного легкого бетона в конструкциях зданий и сооружений.

Ключевые слова: легкий высокопрочный бетон, внутренний уход, аутогенная усадка, удобоукладываемость

ABSTRACT

Lakhtaryna Serhii Viktorovich. Lightweight aggregate high-strength concrete with increased coefficient of constructive quality. - Manuscript.

The Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science on a specialty 05.23.05 – Building Materials and Products. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2016.

In the thesis the formulations of lightweight aggregate high-strength concrete with increased coefficient of constructive quality have been developed. Applying these concretes provides a reduction of material consumption in buildings and structures, the complexity of the construction processes, energy efficiency of buildings.

The mixtures of high-strength lightweight aggregate concrete optimization on the criterion of the quality of the constructive factor: the partial replacement of normal weight aggregates by porous (50% by volume of quartz sand with expanded clay / cenospheres; 25% crushed granite with crushed expanded clay) provide obtaining concretes with compressive strength of 59.4/52.3 MPa, an average density of 1869/1823 kg/m³, the constructive quality factor CCQ = 31/28.

Theoretical and experimental substantiation of reception of high-strength lightweight concrete with increased structural quality ratio and improved deformation char-

acteristics on the basis of the establishment of the laws of the influence of organic-mineral modifiers and the concept of internal curing processes on the properties of concrete have been set up.

The actual value of water absorption by the porous aggregate in cement paste with the additive of organic-mineral modifier has been determined. It amounts 47% of the water absorption in tap water. The water absorption of the cement paste occurs most rapidly during the first 30 minutes.

According to the X-Ray and DTA internal curing provides a higher degree of cement paste hydration. It illustrated by decrease of the intensities of the diffraction reflections of alite ($d=0,277; 0,232; 0,183; 0,154$ nm) and an increase of the intensity of lines of calcium hydrosilicates ($d=0,301; 0.247; 0.208$ nm), compared with samples without internal curing.

It was found that the internal curing, implemented through the introduction of the estimated amount of additional mixing water, minimizes the autogenous shrinkage of lightweight concrete $\varepsilon_{lca} = -100 \times 10^{-6}$, reduces by 35% the drying shrinkage, increases strength and modulus of elasticity of concrete. 2D computer-modeling distribution of water-saturated porous aggregates in the concrete structure indicates that the entire volume of the cement paste is provided with proper internal curing.

On the basis of normative documents in the field of structural lightweight concrete (ACI 213R-03 "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete"; EN 206-1: 2010 "Concrete - Part 1: General specifications, production and quality control") the "Technological regulations production of high-strength lightweight aggregate concrete" has been developed. Technical and economic efficiency of using the high-strength lightweight concrete in the construction of buildings and structures has been calculated.

Keywords: high-strength lightweight aggregate concrete, internal curing, autogenous shrinkage, workability