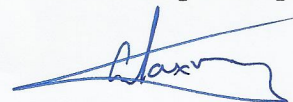


Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры"

*На правах рукописи*



**Лахтарина Сергей Викторович**

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

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**Диссертация**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
ЗАЙЧЕНКО Николай Михайлович



Идентичность всех экземпляров  
диссертации подтверждаю  
Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.006.02



Назим Я.В.

Макеевка – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА .....	13
1.1. Свойства конструкционных легких бетонов. Эффективность применения в строительных конструкциях .....	13
1.2. Усадка высокопрочных легких бетонов .....	22
1.3. Внутренний уход за бетоном .....	30
1.4. Научная гипотеза исследования .....	38
Выводы по разделу 1 .....	40
2. РАЗДЕЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ И МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	41
2.1. Характеристика принятых для исследований материалов .....	41
2.2. Принятые методы и методики экспериментальных исследований .....	44
Выводы по разделу 2 .....	50
3. РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА .....	51
3.1. Влияние предварительного водонасыщения крупного пористого заполнителя на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства легких бетонов .....	51
3.2. Влияние частичной замены плотных заполнителей пористыми на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства легких бетонов .....	55
3.3. Водопоглощение пористого заполнителя в твердеющей цементной пасте .....	61
3.4. Влияние дополнительного количества воды затворения для восста-	

новления подвижности бетонных смесей на физико-механические свойства легких бетонов .....	67
Выводы по разделу 3 .....	71
4. РАЗДЕЛ 4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ .....	72
4.1. Аутогенная усадка и внутренний уход конструкционных легких бетонов .....	72
4.2. Влияние дополнительной воды затворения на показатели полной усадки высокопрочных легких бетонов .....	83
4.3. Механические и деформационные свойства легких бетонов в условиях кратковременного нагружения .....	89
Выводы по разделу 4 .....	95
5. РАЗДЕЛ 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	96
5.1. Исследование технико-экономической эффективности применения легких высокопрочных бетонов в конструкции железобетонной плиты проезжей части автодорожных мостов .....	96
5.2. Энергоэффективные конструктивные решения в монолитном домостроении при комплексном использовании конструкционных легких бетонов .....	106
Выводы по разделу 5 .....	115
ВЫВОДЫ .....	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт внедрения результатов исследования .....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт внедрения результатов исследования .....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт внедрения результатов исследования .....	163

## ВВЕДЕНИЕ

В практике современного строительства с каждым годом всё большее распространение получают конструкции и изделия из высокопрочного лёгкого бетона. Наибольшее распространение высокопрочный лёгкий бетон получил в США, Норвегии, Германии. Растёт его применение в Украине, России, Австралии, Канаде, Великобритании, Франции и других странах.

Анализ целого ряда уникальных проектов, реализованных в мировой практике строительства, показывает, что при проектировании и возведении зданий нового поколения в ближайшее время специалисты будут стремиться к тому, чтобы собственный вес здания был минимальным. Это особенно актуально для больших городов, где существует острый дефицит земельных участков, и проектировщики вынуждены проектировать здания большой этажности. В то же время основания под этими зданиями зачастую могут быть ослаблены в результате прокладки различных инженерных коммуникаций.

Целесообразным представляется также снижение веса зданий при строительстве в регионах с различными подрабатываемыми горными выработками территориями (например, угольные шахты). Практически в любых условиях строительства снижение веса проектируемого здания позволяет экономить арматурную сталь (уменьшении процента армирования конструкций) и бетон за счет снижения нагрузок на фундаменты и несущие конструкции.

Практическим способом решения этой задачи является разработка и применение легких бетонов с повышенным показателем коэффициента конструктивного качества (ККК). Обеспечение повышенного коэффициента конструктивного качества основывается на решении компромиссной задачи: повышении предела прочности бетона при сжатии и снижении его средней плотности.

**Актуальность темы.** 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 фибро-

вым армированием в диапазоне температур от +20° до +300°C" (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., 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.

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 органоминеральными добавками высокопрочных легких бетонов, характеризующихся повышенными коэффициентом 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 повы-

шенным 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 органоминеральных модификаторов и концепции внутреннего ухода на процессы формирования структуры и свойств бетона;

– определено фактическое значение водопоглощения керамзитового гравия в цементной пасте с добавкой органоминеральных модификаторов, идентичной по составу легкобетонной 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.

**Практическое значение результатов диссертации:**

– разработаны составы легких высокопрочных бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества, применение которых обеспечивает сни-



жение 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/м<sup>3</sup>, коэффициентом конструктивного качества ККК=31/28;

– разработан технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества ("Донспецпром", г. Макеевка); рассмотрена целесообразность применения результатов исследования к проектированию элементов автодорожного моста, в частности, для железобетонной плиты проезжей части, наружной несущей стеновой панели жилого дома 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 установлено 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 органических модификаторов и концепции внутреннего ухода на процессы формирования структуры и свойств бетона;
- результаты экспериментальных исследований влияния рецептурных факторов на технологические свойства легковесных 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 восемь статей в рецензируемых научных изданиях: 6 – в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденных МОН Украины; 2 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS; шесть публикаций – в материалах и тезисах конференций.

**Личный вклад соискателя** заключается в выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении ре-

зультатов 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.

## **СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОВЫ- ШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА**

### **1.1. Свойства конструкционных легких бетонов. Эффективность приме- нения в строительных конструкциях**

В последние десятилетия отмечена тенденция увеличения доли конструкци-  
онного легкого бетона прочностью 45-70 МПа в вертикальных несущих элемен-  
тах высотных зданий, предварительно напряженных сборных плит покрытий и  
перекрытий, конструкциях мостов и сооружений оффшорной зоны (Норвегия,  
Голландия, США, Германия, Великобритания, Япония и др.) [1-15]. По оценкам  
специалистов, применение легкого бетона в 1,5-2,5 раза снижает материальные  
затраты по сравнению с обычным тяжелым бетоном аналогичного класса прочно-  
сти. При этом некоторые архитектурные варианты оформления конструктивно  
реализуемы только при использовании высокопрочного легкого бетона [16].

Анализируя известные литературные источники [17-36], можно сделать вы-  
вод, что основные преимущества легких бетонов проявляются, прежде всего, в  
следующем:

- увеличение длины пролетов несущих конструкций, работающих на изгиб, где собственная масса составляет значительную долю от полной нагрузки (большепролетные мосты);
- сокращение расхода бетона и арматуры и, соответственно, транспортиро-  
вочной и монтажной массы, более высокая начальная прочность, более ранняя  
распалубка и предварительное обжатие, что обеспечивает возможность более  
ранней эксплуатации элементов;

- более высокая плотность, водо- и газонепроницаемость микро- и мезоструктуры за счет низкого содержания капиллярных пор;
- более высокая износостойкость;
- повышенная защита арматуры от коррозии за счет чрезвычайно медленного распространения карбонизации;
- повышенная водонепроницаемость, в основе которой лежит противодействие продвижению влаги, порождаемое сжатым воздухом, находящимся в порах и капиллярах заполнителя;
- повышенная стойкость к воздействию различных агрессивных сред;
- возможность получения менее теплопроводного бетона для ограждающих конструкций, что обусловлено тем, что коэффициент теплопроводности вещества, из которого складывается твердая фаза материала, в 100 раз превышает коэффициент теплопроводности воздуха, заключенного в порах. Теплопроводность легких бетонов составляет приблизительно  $1/3$  теплопроводности тяжелых, т. е. они оказывают в три раза большее сопротивление теплопередаче, чем тяжелые [22];
- повышенное сцепление цементного камня с легкими заполнителями, а также протекание пуццолановых реакций на границе раздела "цементная паста – пористый заполнитель", что обеспечивает эксплуатационную долговечность бетона;
- медленная влагоотдача водонасыщенных легких заполнителей, которая обеспечивает бетону последующий "внутренний уход";

Для получения высокопрочных легких бетонов используют те же технологические приемы, что и в технологии тяжелых высокопрочных бетонов: применение высокомарочных, в том числе композиционных цементов и максимально прочных пористых заполнителей; проектирование состава бетона с предельно низким водоцементным отношением; применение супер- и гиперпластификаторов в сочетании с микрокремнеземом или другими тонкодисперсными кремнеземистыми добавками; в ряде случаев осуществляют предварительную подготовку легкого заполнителя (водонасыщение, активация поверхности, гидрофобизация и

др.); особо тщательное перемешивание и уплотнение бетонной смеси с сохранением ее высокой однородности; создание благоприятных условий твердения бетона [37].

Согласно [38] к конструкционным легким относятся бетоны, производимые с применением легких пористых заполнителей, характеризующиеся пределом прочности при сжатии больше 17,2 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и средней плотностью не более 1842 кг/м<sup>3</sup>. Европейским стандартом EN 206-1 для конструкционных легких бетонов установлены диапазоны средней плотности от 1,1 до 2,0 кг/дм<sup>3</sup>, прочности при сжатии – классы от LC8/9 до LC 80/88.

Согласно [39] конструкционными легкими бетонами называются бетоны с плотностью в сухом состоянии от 300 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, с показателями прочности при сжатии образцов кубиков от 1 до 60 Н/мм<sup>2</sup> и коэффициентом теплопроводности от 0,2 до 1,0 В/м·К. При этом высокопрочными легкие бетоны принято считать в случае, когда выполняется условие:  $f_{сж} / \rho_0 \geq 25$  (где  $f_{сж}$  – предел прочности при сжатии, Н/мм<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм<sup>3</sup>) [16] – соотношение, которое по сути и определяет коэффициент конструктивного качества.

Некоторые авторы [18, 35] отмечают, что обычно легкие бетоны дороже тяжелых. Это объясняется, прежде всего, более высокой себестоимостью получения керамзита по сравнению с обычным плотным заполнителем. Кроме того, более высокая стоимость конструкционных легких бетонов связана с повышенным расходом цемента. Отсюда следует, что реальные резервы повышения экономичности легких бетонов заключены как в получении более дешевого керамзита [20, 40], так и в применении бетона с умеренным расходом цемента, что, прежде всего, обеспечивается соответствием прочности заполнителя классу бетона по прочности. Имеется еще весьма существенный резерв, который заключается в снижении толщины обмазки зерен керамзита, что при прочих равных условиях обеспечивает минимальный расход цемента [22].

Однако, несмотря на отмеченные выше факторы, применение конструкционных легких бетонов приводит к снижению стоимости строительства. Сказанное

наблюдается в тех случаях, когда себестоимость керамзита и природного щебня отличаются между собой не более чем в два раза [22, 41].

В то же время, следует отметить, что в отличие от традиционных высокопрочных тяжелых бетонов с прочностью при сжатии 100-110 МПа, при получении высокопрочного легкого бетона прочность пористого заполнителя (например, керамзитового гравия) становится ограничивающим фактором (менее 70 % прочности бетонов на обычных заполнителях). При этом даже незначительные колебания качества пористых заполнителей существенно отражаются на свойствах легких бетонов [42]. Согласно [43] не все пористые заполнители подходят для производства высокопрочного легкого бетона.

Современные конструкционные легкие бетоны в основном получают с применением искусственных пористых заполнителей в виде фракционированного керамзитового гравия (Lіapor 3, Lіapor 8 – Германия; Leca 670, Leca 800 – Дания, Италия, Норвегия); зольного гравия (Lytag – Голландия, Великобритания), а также пористых горных пород, например пемзы, вулканического туфа (Pumice – Исландия) [38, 44].

В Австралии, например, конструкционный легкий бетон с плотностью в сухом состоянии не более  $1800 \text{ кг/м}^3$  изготавливают с применением легких крупных пористых заполнителей и плотного природного мелкого заполнителя [45]. В Норвегии комбинация любых типов заполнителей может использоваться для конструкционного легкого бетона, если средняя плотность таких бетонов составляет  $1200\text{-}2200 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии не более чем 85 МПа [46]. В США конструкционным легким бетоном считается материал со средней плотностью в воздушно-сухом состоянии менее чем  $1810 \text{ кг/м}^3$  [47]. В то же время японские специалисты считают легкими любые бетоны, изготовленные с применением в их составе пористых заполнителей без ограничений по средней плотности [48].

В Украине согласно ДСТУ Б В.2.7-18-95 "Бетони легкі. Загальні технічні умови" к конструкционным легким бетонам относят бетоны с пределом прочности при сжатии от 2,5 до 40 МПа и с показателями средней плотности в сухом со-



стоянии от 800 до 2000 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от вида используемых пористых заполнителей.

В соответствующем европейском стандарте [49] легкий конструкционный бетон классифицирован по значениям средней плотности, следующим образом:

Таблица 1.1 – Классификация легких конструкционных бетонов [49]

Класс по плотности	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Плотность в сухом состоянии (кг/м <sup>3</sup> )	901–1000	1001–1200	1201–1400	1401–1600	1601–1800	1801–2000

Как правило, марка пористых заполнителей по насыпной плотности составляет D 600-800, при этом получают легкие бетоны со средней плотностью  $\rho_0=1700-1900$  кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии  $R=45-60$  МПа, что соответствует значению ККК=26-31, которое удовлетворяет требованиям, предъявляемым к высокопрочным легким бетонам [16].

В то же время, достаточно высокая средняя плотность бетона снижает его эффективность как конструкционно-теплоизоляционного материала. Повышение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций требует снижения средней плотности легкого бетона, что может быть реализовано за счет замены обычного плотного песка пористым, применения крупных пористых заполнителей с меньшей маркой по насыпной плотности (D400-500). Однако это приведет к снижению прочности бетона и, как следствие, уменьшению ККК. Другими словами, для повышения коэффициента конструктивного качества бетона необходимо решать компромиссную задачу одновременного повышения прочности при сжатии и снижения средней плотности бетонов.

Большой объем исследовательских и опытно-экспериментальных работ, выполненных в НИИЖБ, МИСИ, НИИСтром, показывает, что конструкционные

керамзитобетоны с показателями прочности 30-50 МПа и средней плотностью 1500-1800 кг/м<sup>3</sup> обладают повышенной деформативностью (по сравнению с тяжелыми бетонами), высокими показателями ударной вязкости, повышенной предельной нагрузкой трещинообразования, пониженной теплопроводностью и равными с тяжелыми бетонами показателями истираемости [24-27, 50-51].

Конструкционный керамзитобетон обладает высокой морозостойкостью. Проведенные испытания морозостойкости бетона при периодическом замораживании (-20°C) и оттаивании образцов, насыщенных обычной и морской водой, показывают, что после 300-400 циклов образцы из легкого керамзитобетона высоких марок по прочности сохранили свой первоначальный вид (без видимых разрушений); потеря прочности не превышает 15% [17, 36, 41].

Как отмечено в [31], за счет введения в керамзитобетонную смесь специальных добавок можно повысить морозостойкость керамзитобетона в 2-3 раза. Проведены натурные испытания конструкционного керамзитобетона в условиях Дальнего Севера (в естественных условиях на Кольском заливе на специальном стенде). В результате испытания в зоне переменного уровня моря керамзитобетон выдержал более 1000 циклов переменного замораживания и оттаивания [52].

В информационных материалах СЕВФИВ [53-54] приведена информация об эффективности использования легких бетонов в достаточно больших объемах в США, странах западной Европы, Австралии в конструкциях вертикальных рам, преднапряженных стропильных ферм, консольных элементах кровли пролетом до 30 м, большепролетных балок, перекрытиях, плитах покрытий, крупноразмерных оболочках, покрытиях различной конфигурации, пролетных строений мостов.

Весьма эффективно применение легкого бетона в сборных большепролетных несущих конструкциях зданий различного назначения, где существенную долю от расчетной нагрузки имеет их собственная масса. Об этом свидетельствует опыт применения в СССР в 70-80-х годах следующих видов конструкций промышленных и гражданских зданий: предварительно напряженные тонкостенные ребристые плиты пролетом 3×18 м, панели-оболочки типа КЖС пролетом 18, 24 и 36 м из шлакопемзобетона класса по прочности при сжатии В30 для строитель-

ства промзданий в России (г. Липецк, г. Череповец); динакоры - тонкостенные элементы покрытий коробчатого сечения пролетом до 40 м из керамзитобетона класса В30 для общественных зданий (г. Москва).

В гражданском строительстве бывшего СССР из легкого бетона возведены здания в Армении, Узбекистане и Таджикистане. Использовался в основном керамзитобетон, шлакопемзобетон, бетон на природных пористых заполнителях классов по прочности при сжатии В3,5-В25.

Конструкционный легкий бетон наиболее широко применялся и применяется в настоящее время в США, Австралии, Японии, Германии, Австрии, Венгрии, Румынии и др. развитых мировых странах. Особенно эффективно легкий бетон использовался при возведении высотных зданий (Australian Square – Австралия, г. Сидней; Picasso Tower – Испания, г. Мадрид; Like Point Tower – США, г. Чикаго; административные здания высотой 218, 222 и 310 м. – США, г. Хьюстон; правительственное здание Tokyo City Hall – Япония, г. Токио; административные здания Assembly Hall University – США, г. Чикаго, аэропорт Кеннеди – США, г. Нью-Йорк).

При оценке в вышеуказанных странах эффективности применения легкого бетона в зданиях, особенно высотных, учитывается не только эффект снижения их массы на 20-30% с соответствующим снижением нагрузки на основания и возможным существенным сокращением расхода арматуры и расходов на возведение фундаментов. Большое значение для предприятий, которые производят и транспортируют легкобетонные смеси, имеет фактор уменьшения их массы на 20-50%.

Следует также отметить такие уникальные примеры применения легкого бетона в сборных конструкциях таких как: забивные сваи, высоконапорные трубы больших и малых диаметров; сборные элементы морских гидротехнических сооружений, в частности сваи-оболочки причальных сооружений и платформы для добычи нефти (Канада, Норвегия) [10, 38, 44].

В Германии в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия были возведены первые здания и сооружения из высокопрочных легких бетонов. Наиболее интересным стал проект строительства моста Дюккерхофф в Висбадене, где в

преднапряженных железобетонных конструкциях был использован легкий бетон с классом по прочности LC 35 и плотностью в сухом состоянии  $1600 \text{ кг/м}^3$ . Поистине знаковым для бетоноведения стало применение монолитных бетонов класса LC 35/45 с плотностью  $1350 \text{ кг/м}^3$  при возведении южных фасадов Кай-центра в Дюссельдорфе [16]. Этот бетон выполняет одновременно конструктивные, декоративно-архитектурные и теплоизоляционные функции. При возведении административного здания BMW в Мюнхене, высотой 100 м в перекрытиях применен легкий бетон прочностью 30 МПа. Легкий бетон прочностью 45 МПа и средней плотностью  $1750 \text{ кг/м}^3$  применялся при строительстве платформы для прыжков с трамплина в Оберstdорфе [5].

Своеобразный рекорд прочности легкого бетона, уложенного в реальных конструкциях – 75 МПа при средней плотности  $1750 \text{ кг/м}^3$ , принадлежит норвежским специалистам, использовавшим такой бетон при строительстве нефтяной платформы "Хайдрун" [16].

Известен зарубежный опыт использования высокопрочного легкого бетона при строительстве и реконструкции дорог, мостов и путепроводов в США, Японии, Норвегии, Германии, Финляндии и других странах [2-3, 55-59]. Эффективность применения легкого бетона в пролетных строениях мостов определяется, прежде всего, отношением собственного веса этих конструкций к общей расчетной постоянной и временной нагрузкам. Последние 20-30 лет в мировой практике строительства мостов в большинстве стран применяются преимущественно легкие бетоны.

В США из легкого железобетона изготавливают сборные плиты для перекрытий и покрытий, а также монолитные конструкции в жилых и промышленных зданиях. Наиболее интересным является применение легкого железобетона при постройке моста Сан-Франциско – Окленд. Одежда шестиполосного дорожного полотна этого моста протяжением 6,43 км выполнена из легкого железобетона. Предварительно был изучен вопрос, связанный с показателем истираемости легкого бетона. Установлено, что после пятилетней эксплуатации показатели истираемости бетона находились в пределах нормативных значений [22, 60-61]. Бетон с

расходом цемента  $362 \text{ кг/м}^3$  характеризуется пределом прочности при сжатии в возрасте 28 суток 25 МПа, средней плотностью в воздушно-сухом состоянии  $1520 \text{ кг/м}^3$ .

В России также имеется опыт применения высокопрочного керамзитобетона при строительстве автодорожных мостов, аэродромных покрытий (легкие бетоны с прочностью при сжатии от 30 до 50 МПа), сборных плит для автомобильных дорог, что дает экономический эффект 12-15% [1, 36, 57-58].

Целесообразность применения высокопрочного легкого бетона в аэродромных покрытиях была подтверждена исследованиями, выполненными в НИИЖБ, МАДИ, СоюздорНИИ, что дало основание для строительства первого в отечественной и зарубежной практике монолитного аэродромного покрытия из конструкционного керамзитобетона прочностью 30 МПа. Конструкционный керамзитобетон классов В20-В40 в сборных аэродромных предварительно напряженных плитах покрытия обеспечивает положительную эксплуатационную и технико-экономическую эффективность благодаря повышенной трещиностойкости, морозостойкости, долговечности (при этом уменьшаются изгибающие моменты на 18-20%; снижается количество стержневой арматуры на 12-15%) [23].

С точки зрения применения легкого бетона в строительных конструкциях следует выделить два фактора: относительно невысокая средняя плотность и более низкое значение модуля упругости в сравнении с обычным бетоном. Первый из них позволяет снизить собственный вес конструкций и, соответственно, уменьшить размеры строительных элементов или увеличить пролет, а также снизить нагрузки на колонны и фундаменты. Влияние модуля упругости в изгибаемых элементах, по мнению американских специалистов, выражается в понижении нейтральной оси, что влечет за собой увеличение расхода стальной арматуры [22].

В последние годы в НИИЖБ разработаны и успешно используются в монолитных и сборно-монолитных несущих каркасах зданий модифицированные конструкционные легкие бетоны на рядовых пористых заполнителях классов по прочности при сжатии от В15 до В50 при показателях средней плотности 1200-1900  $\text{кг/м}^3$ . В то же время применение высокопрочного керамзита совместно с ор-

гано-минеральными модификаторами позволяет получить бетон с прочностью свыше 60 МПа при средней плотности  $1750 \text{ кг/м}^3$ , при этом используют высокоподвижные (осадка конуса до 25 см) бетонные смеси [16].

Таким образом, большой объем выполненных исследований и результаты внедрения свидетельствуют о перспективности конструкционных легких бетонов, в том числе высокопрочных в современных конструктивных схемах зданий и сооружений. В то же время отмечено, что 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.

Проектирование состава высокопрочного легкого бетона с низким значением водоцементного отношения и повышенным расходом вяжущего в сочетании с комплексом минеральных и химических добавок обуславливает риск трещинообразования бетонов в раннем возрасте твердения вследствие развития усадочных деформаций, вызванных самовысушиванием бетона – аутогенной усадкой.

## **1.2. Усадка высокопрочных легких бетонов**

Образование трещин в бетонных и железобетонных конструкциях снижает их долговечность вследствие попадания различных агрессивных веществ в эти трещины, что обуславливает развитие коррозии бетона и потерю его защитных свойств по отношению к арматурной стали [62-65]. Ремонт и восстановление конструкций, как правило, связаны с высокими показателями трудоемкости и капитальных затрат, поэтому более экономичными являются мероприятия по предотвращению трещинообразования в бетоне [64, 66]. Главными причинами трещинообразования в бетонных покрытиях и конструкциях, которые не связаны с ошибками проектных решений, технологии строительно-монтажных работ и эксплуатационными нагрузками, являются объемные изменения, вызванные усадкой [67]. В технологии бетонов выделяют пять типов усадки: пластическую, аутогенную,

влажностную, термическую и карбонизационную. При этом сложность прогнозирования величины полной усадки связана с тем, что каждая ее составляющая обусловлена различными ведущими эффектами [62, 68].

Пластическая усадка может приводить к образованию трещин на поверхности бетона конструкций с большим модулем открытой поверхности. Она происходит в свежеотформованном бетоне в период от начала до конца схватывания. Величина пластической усадки зависит с одной стороны от особенностей состава бетона, с другой – от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, скорости ветра и температуры бетона [69-70].

Особенную актуальность приобретают исследования различных видов усадки, которые развиваются в раннем возрасте твердения, что может быть причиной образования трещин, когда бетон характеризуется минимальной прочностью при растяжении и модулем упругости, чтобы выдерживать внутренние напряжения [71] (период между 24 и 48 ч после схватывания считается критическим [72]):

$$\sigma_t = E \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_c) \geq f_t, \quad (1.1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $(\varepsilon_c)$  – деформация ползучести;  $(\varepsilon_s)$  – растягивающие напряжения, вызванные усадкой при высушивании.

При этом такая проблема более актуальна для высококачественных (высокопрочных) бетонов с низким значением  $B/C=0,3-0,4$ , в том числе и высокопрочных легких, чем для обычных бетонов [73-75].

Повышение прочности при сжатии в легких бетонах определенной средней плотности, в принципе, базируется на повышении прочности, плотности и жесткости матрицы строительного раствора [21]. Многочисленными исследованиями установлен положительный эффект применения комплекса активных минеральных добавок (микрокремнезем, зола-унос) взамен части портландцемента, а также золошлаковой смеси взамен части плотного мелкого заполнителя [44, 76-78]. Повышение прочности легкого бетона при добавлении микрокремнезема и золы-

уноса обусловлено повышением прочности сцепления между цементной матрицей и пористым заполнителем, а также уплотнением контактной зоны. Это результат как физического, так и химического факторов – микрозаполнитель обеспечивает снижение пористости контактной зоны и повышение плотности микроструктуры, а пуццолановая активность добавок способствует формированию прочных связей между цементной матрицей и поверхностью заполнителя в результате образования низкоосновных гидросиликатов кальция, что подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии [78]. При этом более низкий модуль упругости пористого заполнителя и улучшенная контактная зона вокруг зерен вследствие их пористой поверхности способствует снижению концентрации напряжений между цементным камнем и заполнителем, что впоследствии уменьшает количество трещин в раннем возрасте бетона [62].

Одновременно, пористые заполнители вследствие своей способности к влагообмену с цементным тестом в большей мере, чем плотные заполнители, влияют на процессы структурообразования [79-82]. На первом этапе пористые заполнители, поглощая влагу, способствуют получению более плотного и прочного контактного слоя на поверхности раздела фаз "цементный камень – пористый заполнитель". На втором этапе, при уменьшении количества воды в цементном камне вследствие гидратации цемента, пористые заполнители возвращают ранее поглощенную воду, создавая благоприятные условия для твердения цемента и уменьшая усадочные деформации в цементном камне.

Учитывая необходимость достижения высокой прочности легкого бетона, его состав необходимо назначать с низким значением водоцементного отношения, высоким расходом портландцемента и дисперсных минеральных добавок. В таких бетонах очень быстро формируется сеть микрокапилляров, которые поглощают воду из крупных капилляров в процессе интенсивной гидратации цемента [73], когда происходит уменьшение объема продуктов гидратации в сравнении с объемом исходных ингредиентов (химическая усадка). Химическая усадка обуславливает формирование тонкой пористости и, как следствие, появление менисков, имеющих большой радиус кривизны и создающих высокие сжимающие напряже-



ния на стенки пор вследствие обезвоживания, что приводит к самовысушиванию и образованию пустых пор в материале, когда уже произошло схватывание. Эти процессы создают условия для развития аутогенной усадки – макроскопического уменьшения объема цементирующего материала при гидратации цемента, которая не включает в себя изменения объема, связанные с потерей или поглощением веществ, с изменением температуры или приложением внешней силы или внешнего ограничения деформаций. Другими словами, аутогенная усадка развивается в изотермических условиях, исключаящих влагообмен с окружающей средой [83]. Существует тесная корреляция между внутренней влажностью и аутогенной усадкой бетона [62, 66, 74-75, 84-86].

Аутогенная усадка может быть также охарактеризована как любой прирост напряжений после начала схватывания цемента [87]. Для цементных паст и растворов, аутогенная усадка обычно измеряется согласно процедуре, описанной в ASTM C1698 "Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar".

Известно [88-99], что до момента начала схватывания цементного теста, значения показателей химической и аутогенной усадки – одинаковые (рисунок 1.1), когда в твердеющей системе преобладают еще коагуляционные контакты. Начиная с периода, соответствующего концу схватывания цементного теста, показатели химической и аутогенной усадки отличаются. Это вызвано, прежде всего, тем, что затвердевание цементной матрицы препятствует свободному сокращению системы вследствие химической усадки. Этот процесс сопровождается снижением давления в жидкости, что, в конечном итоге, приводит заполнению пустот в системе – воздухом [42]. Так как гидратация продолжается, количество таких пустот возрастает.

В бетонах с водоцементным отношением менее 0,30 аутогенная усадка может составлять примерно половину значения общей усадки. В высокопрочных бетонах с низким водоцементным отношением аутогенная усадка может достигать значений до  $\varepsilon_{ca} = -1000 \times 10^{-6}$ , а в возрасте 24 часов твердения –  $\varepsilon_{ca} = -250 \times 10^{-6}$  [88]. По оценкам различных исследователей [75, 89-91], большая часть аутоген-

ной усадки проявляется в интервале от нескольких часов до нескольких суток твердения бетона. Одна из причин такого значительного расхождения – сложность измерения усадки в раннем возрасте твердения.

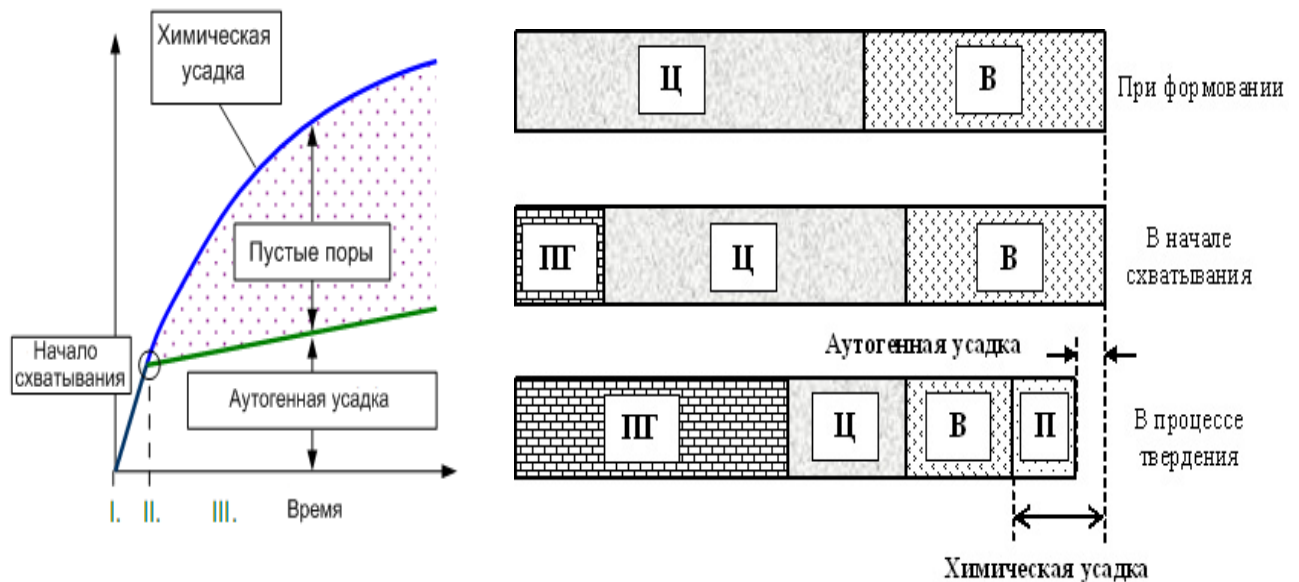


Рисунок 1.1 – Схема развития химической и аутогенной усадки цементной пасты в процессе твердения:

Ц – цемент; В – вода; ПГ – продукты гидратации; П – поры геля

Развитие аутогенной усадки наиболее интенсивно происходит в период времени твердения цементной пасты 1-12 часов, далее замедляется [92]. По сравнению с обычным бетоном, аутогенная усадка в высокопрочном бетоне играет важную роль в объемных изменениях, результатом которых является микротрещинообразование в раннем возрасте. Наиболее опасным является период от 24 до 48 часов твердения, когда в твердеющем бетоне в ходе формирования структуры система имеет наименьшие показатели предела прочности при растяжении и модуля упругости.

Аутогенная усадка ( $\epsilon_{ca}$ ) и усадка при высыхании ( $\epsilon_{cd}$ ) рассматриваются как независимые процессы, в то же время составляют общую величину усадки бетона [49]. При этом, в отличие от усадки при высыхании, собственная (аутогенная)

усадка в определенной мере обратно пропорциональна водоцементному отношению [93].

Так как аутогенная усадка – явление, вызванное отрицательным давлением в результате "самовысушивания" в процессе гидратации цемента, то в основном определяется относительной влажностью и характеристиками порового пространства (общая пористость и распределение пор по размерам) [94].

Развитие деформаций аутогенной усадки можно разделить на три этапа:

- 1) стремительное увеличение в ранние сроки твердения;
- 2) стабилизация;
- 3) постепенное увеличение в поздние сроки твердения.

При этом низкое значение водоцементного отношения сокращает первый и второй периоды, а также ускоряет начало третьего периода.

Деформации аутогенной усадки повышаются с [95]:

- увеличением содержания вяжущего;
- уменьшением водоцементного отношения;
- снижением содержания крупного заполнителя;
- увеличением содержания добавки микрокремнезема.

Очевидно, главным фактором, влияющим на развитие аутогенной усадки цементной пасты (бетона), является водоцементное отношение, которое приводит к уменьшению относительной внутренней влажности системы в процессе твердения – "самовысушиванию" [96-98]. Низкие значения водоцементного отношения и высокое содержание цемента – главные, но не единственные факторы увеличения аутогенной усадки бетона. На нее могут оказывать также влияние химический состав и тонкость помола цемента. Некоторые химические добавки, например, суперпластификаторы, замедлители твердения, а также низкая температура окружающего воздуха также могут увеличивать величину аутогенной усадки [99].

Обезвоживание пор отражается не только на возникновении усадки, но и на кинетике и степени гидратации вяжущего [100]. При этом минеральные добавки, в частности, микрокремнезем увеличивают снижение относительной влажности и инкремент аутогенной усадки цементного камня на ранних стадиях твердения, а

молотый доменный граншлак – на поздних [62, 101]. Так, величина деформаций аутогенной усадки контрольного состава цементной пасты и с добавлением микрокремнезема отличается практически в четыре раза [102].

Исследования О.М. Jensen и Р.Ф. Hansen [90] также подтверждают увеличение аутогенных деформаций цементных систем при добавлении микрокремнезема. Так, в цементной пасте с В/Ц отношением 0,35 и содержании микрокремнезема в количестве 10% аутогенная усадка составляет  $\varepsilon_{ca} = -1500 \times 10^{-6}$ . Результаты исследования [94] свидетельствуют, что при введении микрокремнезема уменьшается внутренняя влажность, а также увеличивается аутогенная усадка цементной пасты в раннем возрасте. В то же время при введении молотого доменного гранулированного шлака также уменьшается внутренняя влажность, но рост величины аутогенной усадка цементной пасты фиксируется в более позднем возрасте твердения. При содержании золы-уноса ТЭС в количестве 25% взамен части цемента величина усадки повышается, однако при содержании 50% – в значительно снижается.

Согласно данным Aitcin и др. [102], аутогенная усадка не значительна при В/Ц отношении более 0,42, однако, такой вид усадки стремительно развивается, если В/Ц отношение ниже, чем 0,42. В исследовании [103] сообщается, что при В/Ц отношении 0,17 аутогенная усадка бетона достигает значения  $\varepsilon_{ca} = -700 \times 10^{-6}$ .

В разных слоях бетона с различной внутренней влажностью отмечено значительное отличие в степени гидратации. Из тонких капилляров влага удаляется практически равномерно [104]. Лимитирующим фактором химической реакции между минералами и водой затворения является отношение объема воды к объему цемента. В упрощенной форме, если это соотношение составляет 1,2, то вся вода связывается цементом, и продукт гидратации может заполнить все пространство, первоначально занимаемой водой затворения. Это соотношение приблизительно соответствует В/Ц=0,4 (по массе). Если В/Ц ниже 0,4, часть цемента всегда будет оставаться негидратированной. Примерно 0,2 В/Ц – химически связано с цементом, другие 0,2 В/Ц – гелевая вода [62]. Следует отметить, что, если уровень относительной влажности в поровом пространстве снижается ниже 80%, то гидратация

прекращается [105]. Неадекватный влажностный уход приводит к увеличению пористости бетона ( $V_p$ ) вследствие низкой степени гидратации цемента ( $\alpha$ ) в соответствии с моделью Пауэрса [111]:

$$V_p = \frac{100w}{c} - 36,15\alpha. \quad (1.2)$$

Для обеспечения более высокой степени гидратации вяжущего необходимо поддержание надлежащей внутренней влажности. При полном водонасыщении гидратация цемента проходит полно и длительное время, что улучшает показатели водонепроницаемости и морозостойкости бетона [106]. Твердение без влажностного ухода приводит также к развитию значительной усадки, снижению эксплуатационных характеристик бетона. При надлежащем влажностном уходе в процессе гидратации цемента поры заполняются продуктами гидратации, снижается открытая пористость и проницаемость бетона [107]. В условиях высоких требований к непроницаемости и долговечности железобетонных конструкций продолжительность ухода должна составлять не менее трех суток [83].

Для высокопрочных бетонов аутогенную усадку в отличие от влажностной усадки невозможно уменьшить путем внешнего ухода за бетоном. Так, полив поверхности бетонной конструкции водой малоэффективен вследствие ограниченной пенетрации влаги в плотную структуру бетона, которая формируется уже в раннем возрасте твердения [62, 84]. По этой причине общепринято, что методы, основанные на введении дополнительного количества воды (к тому количеству, что рассчитывается по водоцементному отношению, исходя из требуемой прочности), более эффективны для данного вида бетонов [108]. Согласно [72] количество воды, необходимое для достижения максимальной степени гидратации в бетоне оценивается из расчетов, основанных на химической усадке и максимальной степени гидратации, теоретически достижимой в цементном тесте:

$$\left(\frac{B}{C}\right)_{\text{вы}} = 0,18 \left(\frac{B}{C}\right) \quad \text{при } B/C \leq 0,36, \quad (1.3)$$

где  $(В/Ц)_{в\text{у}}$  – отношение массы воды для внутреннего ухода к массе цемента;  
 $(В/Ц)$  – водоцементное отношение бетонной смеси.

### 1.3. Внутренний уход за бетоном

Одним из важнейших условий минимизации усадки и трещинообразования бетона в раннем возрасте является правильный уход за бетоном, наряду с модификацией цемента, применением минеральных и химических добавок.

За последние десятилетия научными школами под руководством выдающихся отечественных и зарубежных ученых: Powers, T.C. [111-113]; Jensen, O.M. [90-92, 98]; Bentz, D.P. [97, 100, 104, 114-115]; Geiker, M.R. [85, 89]; Lura, P. [74-75, 88, 116-117]; Hoff, G.C. [9, 62]; Zhutovsky, S. [118]; Ковлер К. [96, 99, 119]; Фаликман В. [16, 12, 108] и др. выполнены теоретические и экспериментальные исследования оптимизации процесса внутреннего ухода за бетоном.

Специалистами международного комитета по уходу за бетоном RILEM [119] предложена классификация способов ухода за бетоном, основанных на контроле его влажности, которая предусматривает как внешний (водный и безводный), так и внутренний (водный и безводный) уход (рисунок 1.2).

Внешний уход (обязательный в первые 7 суток твердения) включает в себя применение водных запруд, водонасыщенных покрытий (влажная мешковина, опилки и т.п.); тонкое распыление воды; использование пленочных и эмульсионных покрытий для защиты бетонируемой конструкции от прямого воздействия ветра и солнечной радиации; снижение температуры бетонной смеси, при условии охлаждения заполнителей и воды затворения и др.

Внутренний уход классифицируют на два типа: водный и безводный. Внутренний водный уход за бетоном предусматривает введение в состав бетона компонентов, которые выполняют функцию "водных резервуаров" в структуре твердеющей цементной системы. Такими компонентами могут быть либо пористые заполнители, например, перлит, пемза, цеолиты, глинистые сланцы, керамзит и др., либо полимеры с высокой адсорбционной способностью (Superabsorbent polymers

– SAP). Внутренний безводный уход предусматривает использование водорастворимых химических добавок, снижающих усадку, например, на основе полиэтиленгликоля (Shrinkage Reducing Admixtures – SRA).

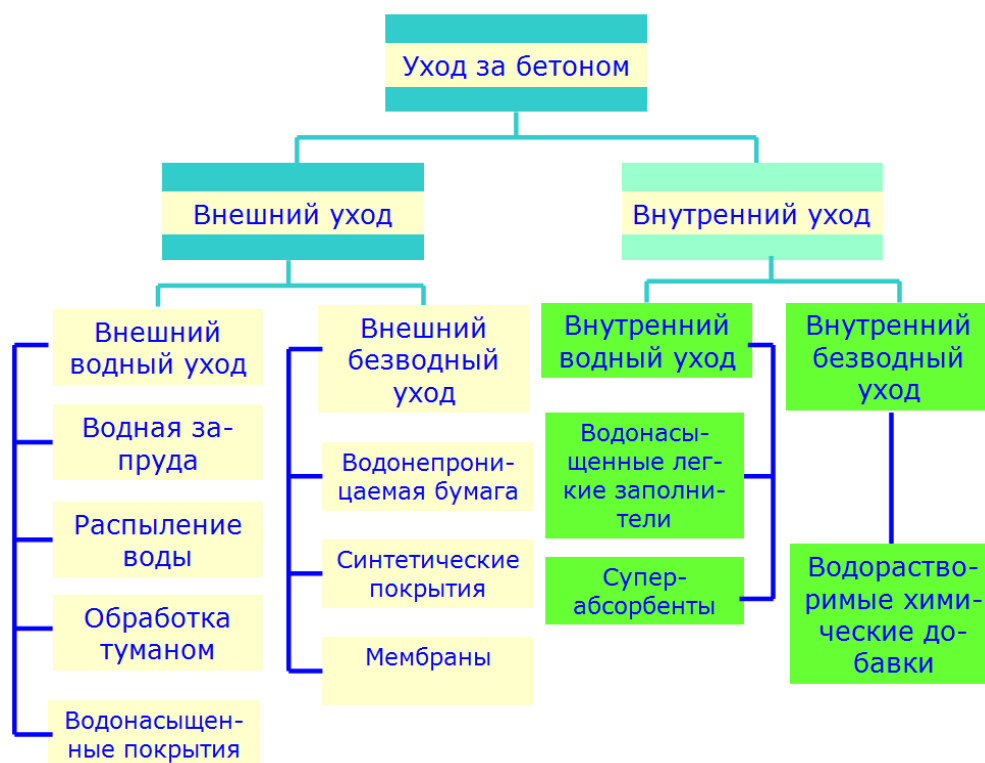


Рисунок 1.2 – Классификация способов ухода за бетоном, основанных на контроле за его влажностью [119]

В противоположность пористым заполнителям, как агентам внутреннего ухода, полимеры SAP используются в виде сухой химической добавки, частицы которой поглощают воду затверения в процессе перемешивания бетонной смеси, что позволяет свободно проектировать поровую структуру и распределение пор по размерам в твердеющем бетоне. Впервые полимеры SAP были применены для внутреннего ухода в 2006 г. при возведении павильона FIFA к чемпионату мира по футболу в Кайзерслаутерне – филигранной конструкции из самоуплотняющегося армированного фиброй бетона с прочностью при сжатии 145 МПа.

Поскольку основная цель внутреннего ухода в высокопрочных бетонах – уменьшение аутогенной усадки и предотвращение микротрещинообразования в раннем возрасте твердения, проведены многочисленные исследования измерений

аутогенных деформаций цементных паст, растворов, и бетонов с внутренним уходом [120-132]. Так, внутренний уход с применением SAP в количестве 0,4% значительно снижает аутогенные деформации – усадка составляет менее  $-50 \times 10^6$ . При этом исключается негативное влияние на удобоукладываемость бетонной смеси (возможность получения самоуплотняющихся бетонных смесей), а также на прочность бетона при сжатии и при изгибе [108].

Значительное внимание уделяется также исследованиям влияния водорастворимых химических соединений или целлюлозных волокон, которые уменьшают испарение влаги при выдерживании бетона в воздушно-сухих условиях, а также миграцию воды в нижерасположенные слои бетона [132-133]. Водорастворимые полимеры, имеющие гидроксильные (-ОН) и эфирные (-О-) функциональные группы, как было установлено, удовлетворяют требованиям по внутреннему уходу за бетоном, то есть обеспечивают сохранение воды в бетоне и повышают степень гидратации цемента. Водородные связи, возникающие между этими функциональными группами, снижают давление паров воды и уменьшают ее испарение.

Из литературных источников известно, что R. Philleo [134] одним из первых в 1990 году предложил использовать, предварительно водонасыщенные пористые заполнители (Light Weight Aggregates – LWA) в качестве агентов внутреннего ухода за бетоном. При этом введение высокопористого заполнителя в плотную цементную матрицу оказывает существенное влияние на механические характеристики бетона. В большинстве случаев отмечено отрицательное воздействие ПЗ на прочность бетона в раннем возрасте. Тем не менее, влияние ПЗ на прочность зрелого бетона является переменным и зависит от типа заполнителя и его содержания, наличия химических добавок [135]. Так, по данным [62] частичная замена (до 25%) плотного песка водонасыщенным пористым не оказывает отрицательного влияния на прочность при сжатии.

Кроме того, более низкий модуль упругости ПЗ и более совершенная контактная зона вокруг зерен заполнителя благодаря их пористой структуре поверхности (рисунок 1.3) обеспечивают снижение концентраций напряжений в контактной зоне, что снижает риск раннего трещинообразования в бетоне [80].



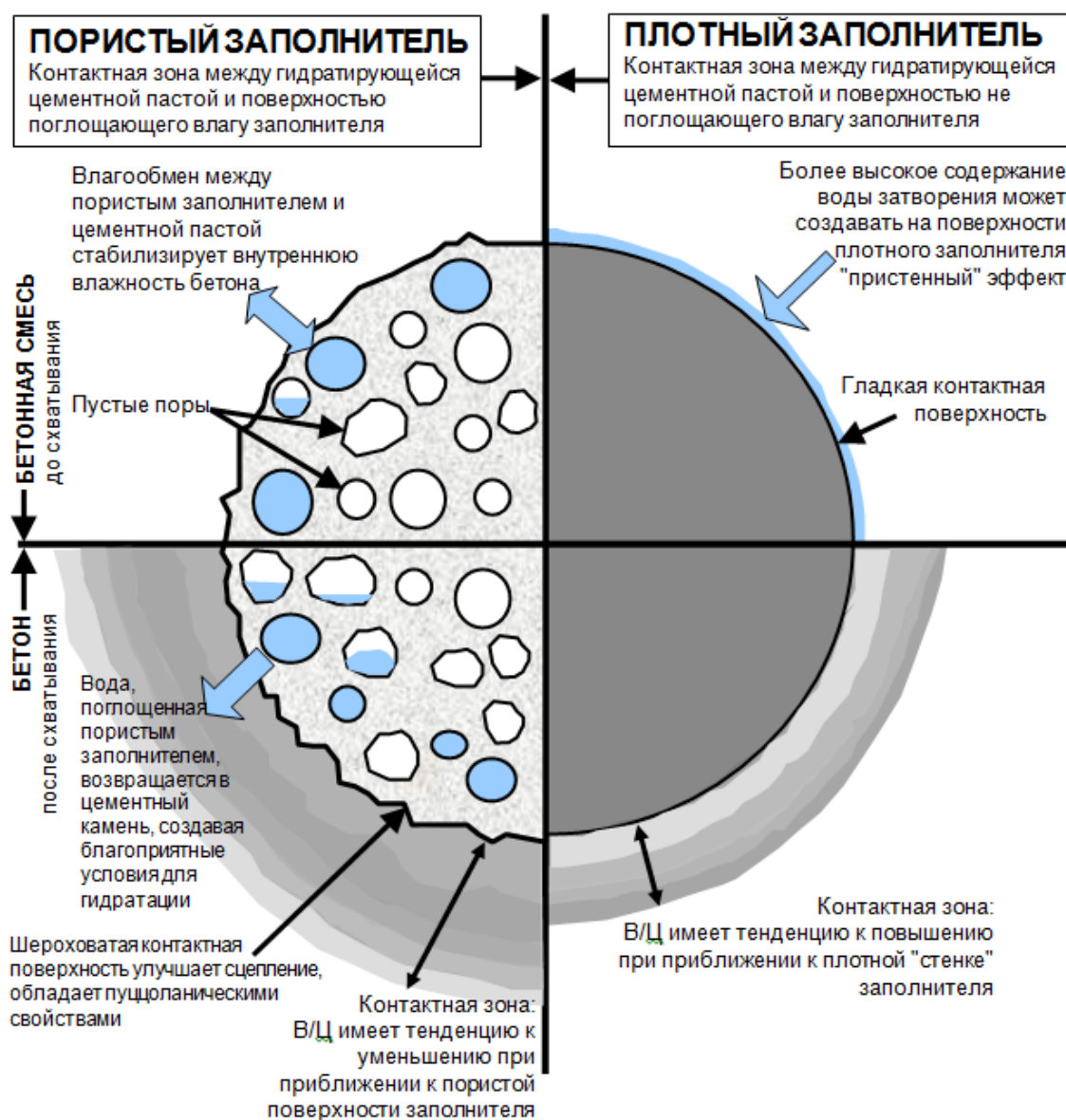


Рисунок 1.3 – Сравнительные характеристики контактной зоны с пористым и плотным заполнителями [Expanded Shale, Clay & Slate Institute, Salt Lake City, UT]

Исследованиями, выполненными немецкими учеными, показано, что применение предварительно водонасыщенного пористого заполнителя Liapor в виде округлых зерен песка и гравия (фракция 4-8 мм) в количестве 25% от общего расхода заполнителей обеспечивает повышение степени гидратации цемента на 20% в возрасте 360 суток и, соответственно предел прочности при сжатии. Голландские ученые использовали пористый заполнитель Lytag или Liapor F10 (фракция 4-8 мм) в количестве 10%, 17,5% и 25% по объему от общего расхода заполнителей (4-8 мм). В бетоне с В/Ц=0,33 замена плотного заполнителя пористым в коли-

честве 10 и 17,5% приводит к повышению прочности при сжатии в сравнении с исходным бетоном, при содержании 25% – не отмечено снижение прочности [62].

Использование дробленого водонасыщенного керамзита в качестве частичной замены плотных заполнителей способствует более полной гидратации вяжущего, формируя более плотную структуру цементного камня, в результате чего на 18% повышается прочность бетона при сжатии, на 15-25% снижаются деформации усадки и на 25% повышается водонепроницаемость [136].

Согласно [110] эффективность внутреннего ухода зависит от трех основных факторов: дополнительного объема воды, доступного для внутреннего ухода (1), что определяется способностью поглощенной воды десорбироваться из пор ПЗ, когда это необходимо (2), и однородностью распределения ПЗ в цементной матрице (3).

В процессе гидратации цемента образуется система капиллярных пор, радиус которых меньше, чем поры ПЗ. Вода десорбируется из пор заполнителя вследствие разрежения, которое развивается в порах гидратирующейся цементной пасты в результате химической усадки и обезвоживания капилляров – самовысыхания. Следствием такого перемещения воды из пор ПЗ в структуру окружающей цементной пасты является повышение относительной внутренней влажности и увеличение критического размера пор, которые остаются водонасыщенными.

Основной механизм внутреннего ухода (рисунок 1.4) состоит в том, что первыми теряют воду наиболее крупные поры в цементной пасте ( $r_1$ ), соответственно капиллярное давление будет сведено к минимуму, если поры обезвоживаются в таком порядке. Поры заполнителя ( $r_2$ ) имеют, как правило, больший размер, чем поры окружающей цементной пасты. При этом в ходе гидратации цемента размер последних постоянно уменьшается, а развивающееся в них давление повышается, что способствует десорбции влаги из пор заполнителя. Следует отметить, что это является концептуальным для целей внутреннего ухода, и поры заполнителя могут, в конечном счете, опустеть в зависимости от степени самовысыхания / гидратации цемента. Тем не менее, в этом случае, размер пор цементной пасты, которые остаются водонасыщенными, будет больше в системе с предварительно водонасыщенным пористым заполнителем, чем в системе без него.

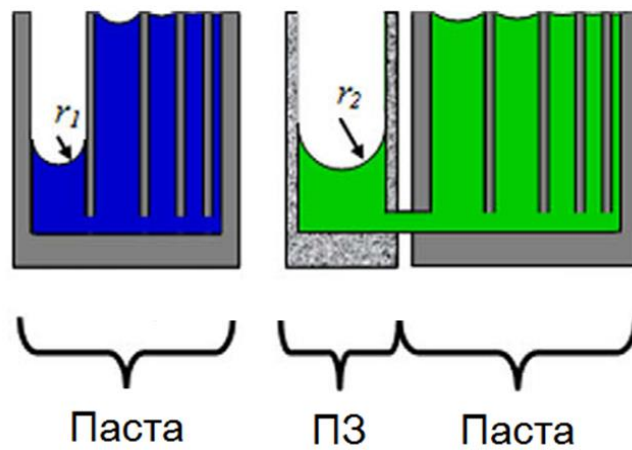


Рисунок 1.4 – Схема распределения по размерам водонасыщенных пор в исходной цементной пасте (слева) и в цементной пасте с предварительно водонасыщенным пористым заполнителем (справа) [110]

Таким образом, агент внутреннего ухода в виде предварительного водонасыщенного пористого заполнителя выполняет функцию внутреннего резервуара в структуре цементной пасты, который способен снизить давление в обезвоженных порах, вновь заполняя их жидкостью, эффективно устраняя их создание в пределах гидратирующегося цемента. Исходя из этого, можно сделать вывод, что объем химической усадки равен объему воды,  $V_w$ , необходимой для внутреннего ухода. Для его определения D.P. Bentz и K.A. Snyder [100] предложили следующую зависимость:

$$V_w = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\max}}{\rho}, \quad (1.4)$$

где  $C_f$  – расход цемента,  $\text{кг/м}^3$ ;  $CS$  – химическая усадка,  $0,06 \text{ л В/кг Ц}$ ;  $\alpha_{\max}$  – максимальная степень гидратации цемента;  $\rho$  – плотность воды,  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Очень важно, чтобы поглощающая способность агента внутреннего ухода была точно определена, так как вариация этого показателя оказывает влияние на его дозировку. Кроме того, такие неточности могут существенно изменять результат влияния внутреннего ухода на предотвращение аутогенной усадки и рост прочности бетона [133].

При использовании в качестве агентов для внутреннего ухода предварительно водонасыщенных пористых заполнителей их расход (масса в сухом состоянии),  $M_{LWA}$ , может быть определен из следующей зависимости [115]:

$$M_{LWA} = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\max}}{S \cdot W_{LWA}} \quad (1.5)$$

где:  $S$  – ожидаемая степень насыщения пористого заполнителя (от 0 до 1), принимается 1 при водонасыщении пористого заполнителя в течение 24 ч;  $W_{LWA}$  – водопоглощение пористого заполнителя в течение 24 ч, (кг воды/ кг пористого заполнителя).

Тем не менее, точная дозировка тонкодисперсных высокоадсорбирующих материалов может быть затруднена вследствие сложности адекватной оценки их адсорбционной способности. Учитывая их относительно высокую удельную поверхность и способность удерживать капиллярную воду между частицами, обычные методы оценки водопоглощения заполнителей (например, ASTM C 127 и C 128) не подходят. Эти методы основаны на определении количества поверхностной влаги и являются более эффективными для минеральных крупных заполнителей. Кроме того, стандартные методы исследования, как правило, осуществляют в воде, которая не может моделировать условия, происходящие в цементной пасте. Существует вероятность того, что поглощающая способность агента внутреннего ухода будет отлична при исследовании в воде и в концентрированных растворах (поровая жидкость цементной пасты). В идеале, адсорбционная способность агента внутреннего ухода должна быть определена в условиях, аналогичных тем, какие в реальном бетоне [133].

Кроме того, следует отметить, что дополнительный объем воды, не является единственным важным фактором для эффективного внутреннего ухода. Пространственное распределение этой воды также важно. По этой причине мелкий легкий заполнитель, как правило, предпочтительнее для внутреннего ухода, по сравнению с крупным легким заполнителем. Это связано с более однородным распределением воды для внутреннего ухода в цементной матрице.

Как правило, наиболее эффективный внутренний уход обеспечивает, частичная замена мелкого плотного заполнителя – предварительно водонасыщенными пористыми заполнителями, аналогичной фракции. G.C. Hoff отмечает, что использование пористых заполнителей может создать более плотную цементную матрицу и снизить самовысушивание и аутогенную усадку таких систем [62]. Количество пористых заполнителей, которое необходимо для внутреннего ухода, зависит от вида пористого заполнителя, его размеров, водопоглощения, а также от вида и количества вяжущего вещества. Внутренний уход наиболее необходим для бетонов, которые содержат в составе золу-унос, микрокремнезем и другие минеральные добавки. Hoff также отмечает, что при более плотной матрице высокопрочных бетонов, в результате внутреннего ухода, повышаются их прочностные характеристики, а также понижается водо- и паропроницаемость. В то же время, нет необходимости в изменении времени последовательности загрузки и времени перемешивания бетонной смеси при введении предварительно водонасыщенных пористых заполнителей.

Исследования [89] подтверждают, что при введении 20% предварительно водонасыщенного пористого заполнителя взамен плотного песка в состав бетона, характеризующегося В/Ц отношением 0,35 и наличием микрокремнезема в количестве 8% от расхода цемента, аутогенная усадка полностью нивелируется.

Согласно [75] наиболее благоприятное влияние как на деформационные (аутогенная усадка), так и прочностные показатели бетона оказывает частично водонасыщенный (на 50%) пористый заполнитель, так как при большем водонасыщении увеличивается значение эффективного водоцементного отношения, и снижается прочность бетона.

Следует также отметить, что применение технологии внутреннего ухода для высокопрочных бетонов снижает вероятность образования микротрещин вследствие пластической и влажностной усадки. При испарении влаги с поверхности свежееотформованной конструкции в поверхностных слоях бетона возникает дополнительный градиент влажности, что ускоряет возникновение локализованных градиентов влажности. Вода из пористого заполнителя вблизи поверхности по-

требуется поэтому быстрее, чем внутри бетона, тем самым, вызывая уплотнение приповерхностного слоя бетона за более короткий период времени. Это обеспечивает уменьшение количества воды, которое обычно испаряется и способствует повышению прочности бетона. Это также приводит к снижению или исчезновению напряжений, обусловленных сушкой, и помогает устранить поверхностные трещины [62].

Однако предварительное увлажнение заполнителя существенно усложняет технологию производства, и зачастую приводит к снижению его прочности [137], а введение дополнительного количества воды затворения непосредственно перед укладкой на строительном объекте, может существенно снижать прочность бетона – до 35% и больше [81]. 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 прочность бетона [79]. 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 [21, 74, 85, 91, 96, 100, 103, 113, 108, 118], в значительно меньшей мере – для конструкционного легкого бетона.

#### **1.4. Научная гипотеза исследования**

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 замачивание заполнителя до состояния полного водонасыщения, что, как отмечено выше, усложняет технологический процесс и снижает прочность заполнителя. В то же время, избыток воды за-

творения, 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 концепцией внутреннего ухода.

## Выводы по разделу 1

1. Согласно современным представлениям конструкционные легкие бетоны принято считать высокопрочными в случае, когда выполняется условие:  $f_{сж}/\rho_0 \geq 25$  (где  $f_{сж}$  – предел прочности при сжатии, Н/мм<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм<sup>3</sup>) – соотношение, которое по сути и определяет коэффициент конструктивного качества.

2. Основа современной технологии высокопрочных бетонов базируется на создании высококачественного цементного камня, характеризующегося высокой дисперсностью, низкой дефектностью и постоянством структуры, на основе которой могут быть созданы различные по назначению бетоны путем вкрапления в структуру дополнительных составляющих и ее модификации.

3. Современные высокопрочные легкие бетоны в основном получают с применением искусственных пористых заполнителей в виде фракционированного керамзитового гравия (Liapor 3, Liapor 8 – Германия; Leca 670, Leca 800 – Дания, Италия, Норвегия); зольного гравия (Lytag – Голландия, Великобритания), а также пористых горных пород, например пемзы, вулканического туфа (Pumice – Исландия).

4. Из анализа литературных источников следует, что, для достижения высокой прочности легкого бетона, его состав необходимо назначать с низким значением водоцементного отношения, высоким расходом портландцемента и дисперсных минеральных добавок. Перечисленные факторы создают условия для развития аутогенной усадки таких бетонов.

5. В структуре высокопрочного легкого бетона наиболее эффективно реализуется концепция внутреннего ухода за счет большого количества пористых заполнителей, что в свою очередь, улучшает удобоукладываемость бетонной смеси, а также способствует уменьшению образования микротрещин вследствие пластических, температурных и усадочных деформаций.



**РАЗДЕЛ 2****ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ  
И МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ****2.1. Характеристика принятых для исследований материалов**

При проведении экспериментов в качестве исходных материалов приняты:

**Вяжущее вещество:**

- портландцемент (ПЦ) Балаклеевского комбината СЕМ I-42,5 N (активность  $525 \text{ кгс/см}^2$ ; нормальная густота 26%);
- портландцемент Криворожского комбината СЕМ I-42,5 N (активность  $516 \text{ кгс/см}^2$ ; нормальная густота 25%);
- портландцемент Aalborg rapid cement СЕМ I-52,5N (активность  $610 \text{ кгс/см}^2$ ; нормальная густота 24,5%);

**Мелкий заполнитель:**

- песок кварцевый (П) Краснополянского месторождения (модуль крупности 2,0; насыпная плотность  $1458 \text{ кг/м}^3$ );
- песок керамзитовый (ПК) (модуль крупности 3,5; насыпная плотность  $462 \text{ кг/м}^3$ );

**Крупный заполнитель:**

- гравий керамзитовый (ГК) Леса® фракций: 2-4 мм; 4-8 мм (круглая форма зерен); основные свойства приведены в таблице 2.1, (рисунки 2.1, 2.2);
- гравий керамзитовый Марганецкий фракции 10-20 мм (насыпная плотность  $380 \text{ кг/м}^3$  – D400; водопоглощение по массе, 24 часа – 39%; прочность при сдавливании в цилиндре 1,68 МПа – марка по прочности П75);
- гравий керамзитовый Марганецкий, фракция 5-10 мм (насыпная плотность  $561 \text{ кг/м}^3$  – D600; средняя плотность зерна –  $1097 \text{ кг/м}^3$ ; водопоглощение по массе, 1 час – 18,5%; прочность при сдавливании в цилиндре 2,02 МПа – марка по прочности П100);

- щебень керамзитовый (ЩК), фракция 5-10 мм;
- щебень гранитный (ЩГ), фракция 5-10 мм (насыпная плотность 1390 кг/м<sup>3</sup>).

#### **Химические модификаторы:**

- суперпластификатор (СП) Sica Viscocrete-2300 HE; (водный раствор модифицированных поликарбоксилатов, плотность 1,08 кг/л);
- суперпластификатор Dymomon SR-3 (водный раствор модифицированных полиакрилатов, плотность 1,02 кг/л, содержание сухого вещества 30%);
- гиперпластификатор MELFLUX 5581 F "BASF Constraction Polymers" (Trostberg, Германия) (сухой порошок на основе эфира поликарбоксилата модифицированного диоксидом кремния);

#### **Минеральные добавки:**

- микрокремнезем (МК) MAPEPLAST SF (содержание SiO<sub>2</sub>>85%; удельная поверхность – 25 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 620 кг/м<sup>3</sup>);
- микрокремнезем Elkem Microsilica Norway (удельная поверхность – 20 м<sup>2</sup>/г, содержание SiO<sub>2</sub>>88%);
- зольные микросферы (ЗМС) Старобешевской ТЭС (насыпная плотность 340 кг/м<sup>3</sup>), химический состав приведен в таблице 2.2;
- зола-унос (ЗУ) ТЭС (насыпная плотность  $\rho_n=964$  кг/м<sup>3</sup>).

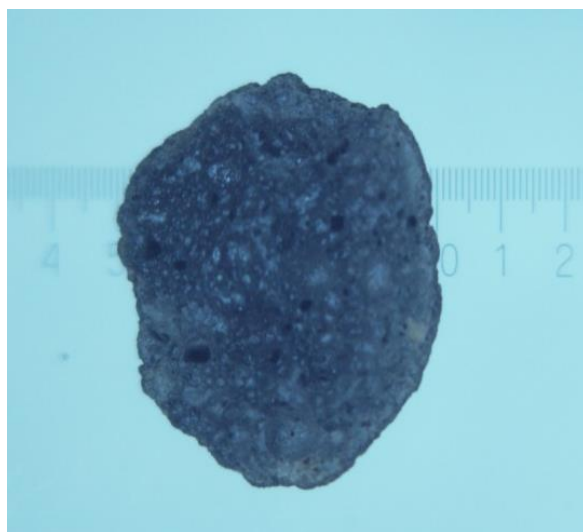


Рисунок 2.1 – Внешний вид пористого заполнителя Leca<sup>®</sup>

Таблица 2.1 – Основные свойства керамзитового гравия Леса

№ п/п	Наименование показателя	Значение для керамзита фракции, мм	
		2-4	4-8
1	Средняя плотность в зерне, кг/м <sup>3</sup>	830	710
2	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	420	410
3	Водопоглощение (в вакууме), % по массе	58	85
4	Пористость общая, %	69	74

Таблица 2.2 – Химический состав зольных микросфер Старобешевской ТЭС

Содержание оксидов, %									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MnO	ППП
62	26	3,4	3,1	1,3	1,2	0,8	0,6	0,04	1,56

Водопоглощение пористого заполнителя определяли согласно ASTM C 127 – 07 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Для этого образец, высушивают при температуре 105-110°C до постоянной массы. Далее образец взвешивают с точностью  $\pm 0,01$  г и погружают в воду на 24 ч, после этого извлекают из воды, поверхность заполнителя сушат и повторно определяют массу образца в водонасыщенном состоянии, но с сухой поверхностью зерен (*saturated-surface-dry SSD*). Для этого заполнитель, после выдерживания в воде помещается в конус (рисунок 2.2 а) и уплотняется штыковой массой 340 г не менее 25 раз.

Это испытание строится по принципу поверхностного натяжения для определения, когда исчезает вода с поверхности заполнителя. При влажной поверхности заполнителя поверхностное натяжение воды будет удерживать частицы в форме конуса (рисунок 2.2 б). При сухой поверхности заполнителя будет происходить его осыпание после удаления металлического конуса (рисунок 2.2 в).



Рисунок 2.2 – Определение водопоглощения пористого заполнителя согласно ASTM C 127-07: а) внешний вид конуса, б) водонасыщенный пористый заполнитель с влажной поверхностью, в) водонасыщенный пористый заполнитель с сухой поверхностью

## 2.2. Принятые методы и методики экспериментальных исследований

Методика проведения исследовательских работ включала литературный обзор и анализ ранее выполненных научно-исследовательских работ и практического опыта в данном направлении.

Подготовку сырьевых материалов (сушка, помол и т.д.) осуществляли с помощью стандартного лабораторного оборудования. Физико-механические свойства вяжущих, заполнителей, минеральных добавок, цементных паст, бетонных смесей и бетонов определяли по стандартным методикам.

Технологические свойства бетонных смесей определяли в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-114-2002 "Бетонні суміші. Методи випробувань".

Физико-механические свойства легких бетонов определялись по стандартным методикам. Прочностные показатели бетонов определяли на образцах-призмах размером  $0,1 \times 0,1 \times 0,4$  м; образцах-кубах размером  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м,  $0,07 \times 0,07 \times 0,07$  м, а также на образцах-цилиндрах размером  $0,06 \times 0,12$  м согласно [138]. Образцы твердели при нормальных условиях при температуре  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ , а также в условиях, исключающих обмен влагой с окружающей средой при темпе-

ратуре  $t=30^{\circ}\text{C}$  в течение 7, 28, 90 и 180 суток. Перед испытанием образцы высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре  $t=105-110^{\circ}\text{C}$ .

Степень гидратации цемента рассчитывали путем определения химически связанной воды в соответствии с процедурой, описанной в работе [112]. Для этого небольшие образцы затвердевшего цементного камня каждой смеси в испытуемом возрасте дробили до кусочков размером около 1-3 мм в агатовой или фарфоровой ступке. Затем навеску дробленого материала переносят в бюкс, заливают абсолютным этиловым спиртом и оставляют на 10-20 часов, чтобы остановить гидратацию. Отделение спирта от материала производят путем фильтрации через бумажный фильтр. Далее образцы взвешивают с точностью  $\pm 0,001$  г и сушат в сушильном шкафу при температуре  $105-110^{\circ}\text{C}$  в течение 48 часов. После этого образцы снова измельчают в агатовой или фарфоровой ступке до прохождения через сито № 0.08, повторно взвешивают, помещают в муфельную печь и со скоростью приблизительно  $250^{\circ}\text{C}/\text{час}$  поднимают температуру до  $1050^{\circ}\text{C}$ , выдерживая 2 часа. Образцы были повторно взвешены после достижения равновесной температуры, как в лаборатории. Разница между массами до и после обжига – является испаренной химически связанной водой.

Степень гидратации  $h$  может быть определена по следующей формуле:

$$h = W_n / W_{\text{полн}} \quad (2.1)$$

где:  $W_n$  – количество химически связанной воды,  $W_{\text{полн}}$  – количество химически связанной воды при полной гидратации цемента.

Согласно [91] при полной гидратации цемента в замкнутых условиях (т.е. без обмена с окружающей средой) приблизительно 0,23 г воды химически связывается с 1 г цемента – называется химически связанной водой. В то же время – 0,19 г воды физически связывается с 1 г цемента. Не связанная вода или капиллярная вода – это вода, содержащаяся в крупных капиллярных порах, которая испаряется при температуре  $95-100^{\circ}\text{C}$ .

Химическую усадку цементных паст определяли по объемному методу, описанному в ASTM C1608-07 Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste. Для этого около 10 г цементной пасты каждого состава

укладывалось в стеклянную колбу диаметром 22 мм и высотой 55 мм. Затем аккуратно доливали воду до края колбы, плотно закрывали колбу резиновой пробкой со стеклянной градуированной капиллярной трубкой с ценой деления 0,01 мл и размещали в лаборатории при постоянной температуре 20° С. Измерения высоты столба воды в капиллярных трубках проводили каждые 30 минут с точностью до 0,01 мл. Схема устройства для определения химической усадки представлена на рисунке 2.3.

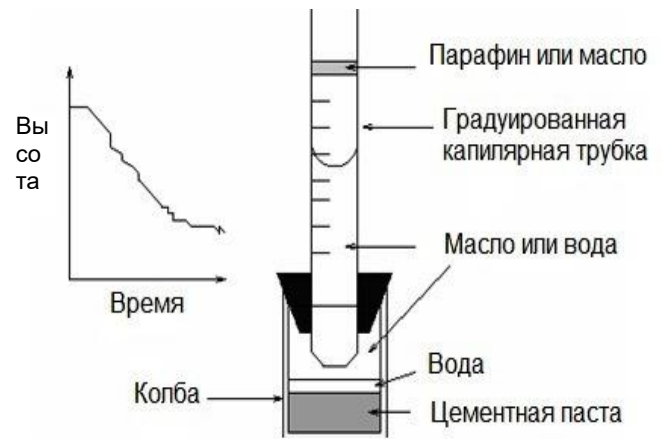


Рисунок 2.3 – Схема устройства для определения химической усадки цементных паст

Химическую усадку цемента, в мл/г цемента, можно определить по формуле

$$CS_t = \frac{(h_t - h_{60})}{M_{\text{цем}}} \quad (2.2)$$

где:  $CS_t$  - химическая усадка в момент времени  $t$  (мл/г цемента);

$h_t$  - уровень воды в капиллярной трубке в момент времени  $t$  (мл);

$h_{60}$  - уровень воды в капиллярной трубке после 60 мин (мл);

$M_{\text{цем}}$  - масса сухого цемента (г).

Аутогенная усадка измерялась с помощью автоматизированного dilatометра (рисунок 2.4 а) конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена [139].

Бетонную смесь после перемешивания помещают в гофрированную поливинилхлоридную трубу длиной приблизительно 350 мм и внутренним диаметром 82 мм (рисунок 2.4 б). Измерение деформаций проводились с помощью электрон-



ного индикатора TRANS-ТЕК серии 305 с точностью до 0,003 мм. Перед испытанием индикатор калибровался на специализированном стенде. Измерения начинались с момента конца схватывания цементного теста, которое составляло приблизительно 3,5 часа. Показатели деформаций регистрировались с интервалом в 5 минут в течение всего измерения. Измерения проводились при постоянной температуре, для этого образцы были помещены в бассейн с полигликолем, который оснащен специальным нагревателем и водяной системой охлаждения (рисунок 2.4 в). При этом в помещении, где проводились измерения, также поддерживалась постоянная температура и влажность в течение всего цикла измерения.

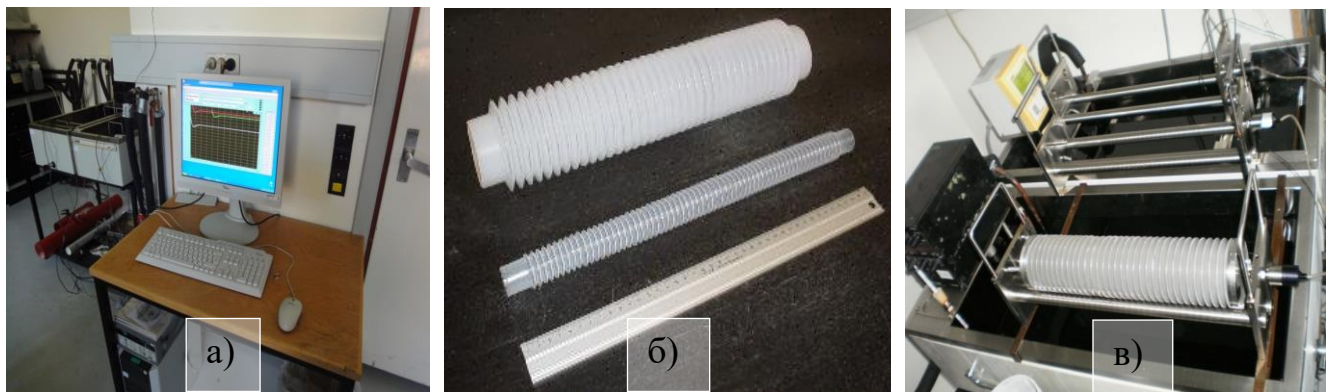


Рисунок 2.4 – Измерение аутогенной усадки бетона:

а) автоматизированный дилатометр, б) ПВХ гофрированные трубки для измерения аутогенной усадки бетонов и растворов, в) бассейн с полигликолем и системой нагрева и охлаждения

Усадка при высушивании бетонов исследовалась на образцах-призмах размером  $0,04 \times 0,04 \times 0,16$  м, а также образцах-призмах размером  $0,1 \times 0,1 \times 0,4$  м. Схема устройства для определения деформаций усадки образцов бетона представлена на рисунке 2.5. Измерения линейных деформаций проводились с помощью индикатора часового типа с точностью до 0,001 мм.

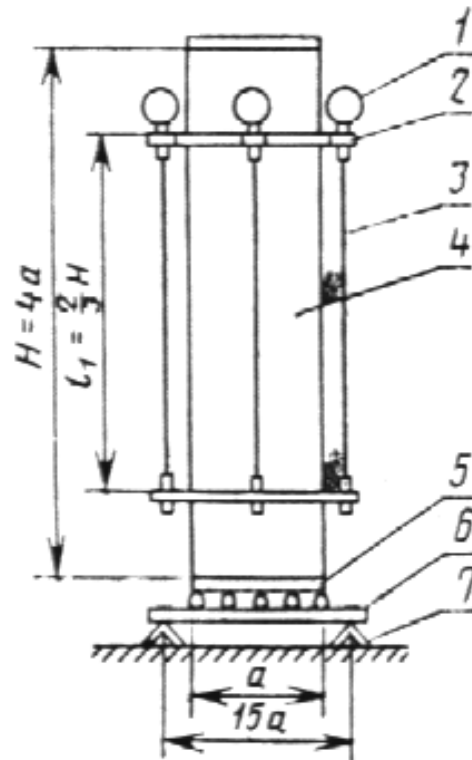


Рисунок 2.5 – Схема устройства для определения деформаций усадки образцов бетона:

1 - индикатор часового типа; 2 - рамка для крепления индикаторов; 3 - качающаяся штанга; 4 - образец; 5 - металлические пластинки по торцам образца; 6 - плоская сварная сетка; 7 - опора

Изменение внутренней влажности образцов бетонов определялось при помощи станции Rotronic Hygroscope DT (рисунок 2.6) в соответствии с процедурой, описанной в работе [140]. Каждая станция имеет датчик температуры РТ-100 и влажности DMS-100. Станции находятся в термостатически-контролируемом ящике с точностью контроля температуры до  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Показатели автоматически измерялись с интервалом 5 мин в течение всего периода твердения с точностью измерения  $\pm 1\%$ .

До и после каждого измерения, датчики калибровались при помощи насыщенных солевых растворов  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$  в пределах от 75 до 100%. Более детальное описание калибровки и измерения внутренней влажности процедуры опубликовано в работе [90].





Рисунок 2.6 – Станция Rotronic Hygroscope DT для измерения внутренней влажности цементных систем

Рентгенофазовый анализ образцов цементного камня выполнен на установке "Дрон-4-07" (рисунок 2.7). Условия съемки дифрактограмм (одинаковые для всех образцов): медное излучение с длиной волны  $\lambda=0,154178$  нм при ускоряющем напряжении 27 кВ и токе 15  $\mu\text{A}$ ; щели для съемки  $0,5 \times 4 \times 0,25$  мм (0,5 – вертикальная коллимационная щель; 4 – горизонтальная коллимационная щель; 0,25 – щель на детекторе). Съемка дифрактограмм осуществлялась в пошаговом режиме ( $2\theta=10-80$  град. с шагом 0,1 и временем экспозиции 5 с).

Расшифровку рентгенограмм осуществляли в соответствии с [141-142].



Рисунок 2.7 – Дифрактометр рентгеновский общего назначения ДРОН 4-07

## Выводы по разделу 2

1. Исходя из известных установленных зависимостей эффективности различных химических добавок, в частности пластификаторов (суперпластификаторов), замедлителей схватывания, от минералогического состава клинкера цемента, для выполнения программы экспериментальных исследований приняты цементы, отличающиеся содержанием трехкальциевого алюмината: портландцемент Балаклевского комбината СЕМ I-42,5 N ( $C_3A=6,8\%$ ), портландцемент Криворожского комбината СЕМ I-42,5 N ( $C_3A=7,8\%$ ), портландцемент Aalborg rapid cement СЕМ I-52,5N ( $C_3A=4,8\%$ ).

2. Для получения высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества использован рядовой керамзитовый крупный и мелкий заполнитель, в частности: гравий керамзитовый фракции 10-20 мм (марка по прочности П75), керамзитовый гравий фракции 5-10 мм (марка по прочности П100), щебень керамзитовый фракции 5-10 мм (марка по прочности П100), пористый заполнитель Leca (Denmark) фракций: 2-4 и 4-8 мм.

3. Развитие аутогенной усадки цементного камня и бетона в раннем возрасте предложено исследовать на автоматизированном дилатометре согласно методике ASTM C1698-09 "Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar".

4. Эффективность внутреннего ухода легкого конструкционного бетона предложено оценивать на основе показателя внутренней влажности твердеющих бетонов при помощи станции Rotronic Hygroscopic DT.

## **РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА**

### **3.1. Влияние предварительного водонасыщения крупного пористого заполнителя на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства легких бетонов**

Повышение прочности при сжатии легких конструкционных бетонов определенной средней плотности, в принципе, базируется на повышении прочности, плотности и жесткости матрицы строительного раствора [21]. В то же время, пористые заполнители вследствие своей способности к влагообмену с цементным тестом в большей мере, чем плотные заполнители, влияют на процессы структурообразования. При перемешивании бетонной смеси пористый заполнитель поглощает некоторое количество воды затворения, тем самым снижая удобоукладываемость бетонных смесей. Потеря подвижности бетонной смеси на строительной площадке – одна из главных причин, которая приводит к неоднородности прочности и снижению долговечности бетона в конструкциях.

Применение при приготовлении бетонной смеси увлажненных крупных заполнителей предпочтительнее сухих, так как они, как правило, поглощают меньше воды затворения, что снижает вероятность потери удобоукладываемости смеси в процессе перемешивания, транспортирования и укладки [81-82].

Предварительное водонасыщение пористых заполнителей положительно отражается также в процессе твердения и набора прочности бетона. Учитывая необходимость достижения высокой прочности легкого бетона, его состав необходимо назначать с низким значением водоцементного отношения, высоким расходом портландцемента и дисперсных минеральных добавок. Перечисленные

факторы приводят к риску трещинообразования бетона в раннем возрасте вследствие развития аутогенной усадки.

Выполнено исследование влияния предварительного водонасыщения пористого заполнителя на прочностные характеристики конструкционного легкого бетона, а также сохраняемость подвижности легкобетонных смесей в течение определенного промежутка времени.

Технологические свойства бетонных смесей, в частности подвижность и ее потерю во времени определяли по осадке стандартного конуса Абрамса. Предел прочности при сжатии бетонов определяли на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м, твердевших в нормальных условиях 3, 7, 14, 28 и 56 суток. Были разработаны составы легких конструкционных бетонов с сухим и предварительно водонасыщенным пористым заполнителем – керамзитовым гравием фракции 20-40 мм.

Таблица 3.1 – Состав и свойства свежеприготовленной бетонной смеси

№	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>								Свойства бетонной смеси	
	ПЦ	МК	ЗУ	ПК	ГК	СП, л	В, л	В/В	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	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; \*\* - водовязущее отношение (В/(ПЦ+МК)) без учета количества воды, содержащейся в порах заполнителя.

Бетонная смесь с предварительно насыщенным в воде керамзитовым гравием (состав № 1) в процессе выдержки после приготовления имеет ярко выраженную тенденцию к повышению подвижности (рисунок 3.1). Максимальное значение осадки конуса – 20 см, достигается после 60 минут выдержки смеси, в дальнейшем происходит незначительное снижение, в то же время в пределах 90 минут бетонная смесь сохраняет показатели подвижности, соответствующие марке по удобоукладываемости П4. Нарастание значений подвижности смеси обусловлено двумя факторами. Во-первых, предварительно водонасыщенный (до 100%) пори-

стый заполнитель не поглощает из смеси воду затворения, а, скорее, отдает воду из наиболее крупных пор и капилляров, повышая при этом водоцементное отношение смеси. С другой стороны, увеличение подвижности связано с особенностями действия применяемого в эксперименте полиакрилатного суперпластификатора. Известно, что обязательным условием пластификации бетонных смесей является адсорбция молекул суперпластификатора на частицах цементах и продуктах его гидратации для создания электростерического барьера отталкивания. С ростом количества новообразований в процессе гидратации портландцемента увеличивается количество адсорбированного полимера на их поверхности, что и обеспечивает повышение подвижности смеси.

Если используется пористый заполнитель в состоянии естественной влажности, при значении водовяжущего отношения 0,38 достигается начальная подвижность бетонной смеси лишь 4 см. При этом в процессе выдержки после приготовления смеси наблюдается резкая потеря подвижности – в пределах 90 минут до 0,4 см. Очевидно, это связано с интенсивным поглощением влаги пористым заполнителем.

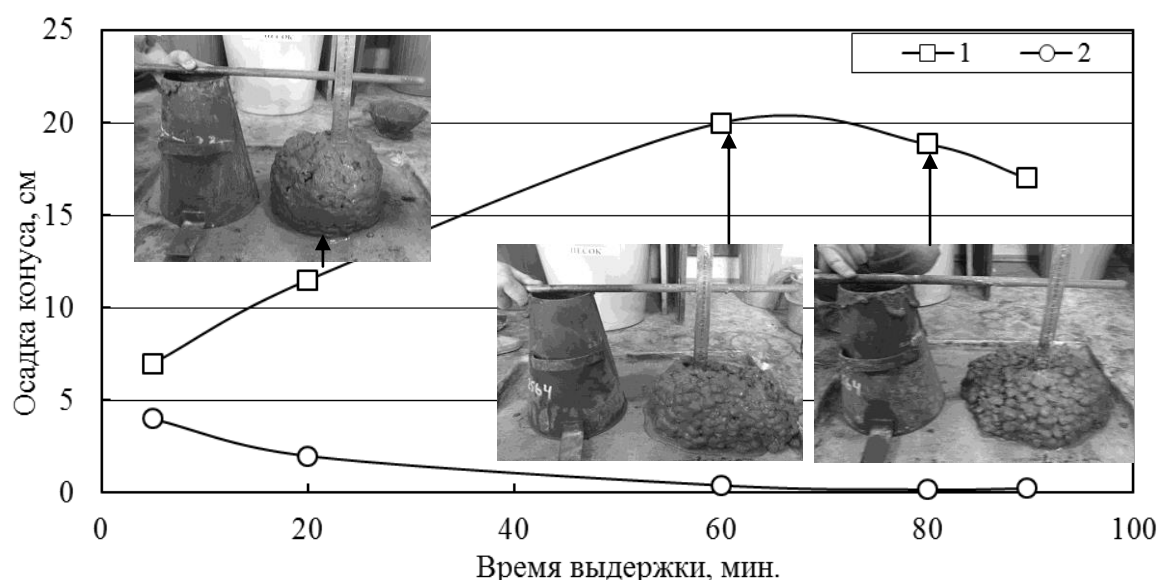


Рисунок 3.1 – Изменение подвижности бетонных смесей в процессе выдержки после приготовления: 1, 2 – составы бетонных смесей (таблица 3.1)

Относительно прочностных показателей легкого бетона следует отметить следующее. Значения предела прочности при сжатии бетона состава № 2, особенно в ранние сроки твердения, выше, чем бетона состава № 1 (рисунок 3.2). Несмотря на то, что начальное значение водовяжущего отношения бетона состава № 1 на 13% меньше, чем состава № 2, фактическое значение водовяжущего значения с учетом влаги, содержащейся в порах заполнителя, значительно выше. Этот фактор должен бы положительно проявиться на показателях прочности бетона, испытанного в более поздние сроки твердения, исходя из наличия влаги для протекания реакций гидратации портландцемента и взаимодействия гидроксида кальция с активным кремнеземом пуццолановых добавок. Однако прироста прочности бетона с водонасыщенным заполнителем практически не наблюдается. Причиной тому является, вероятней всего, резкая потеря прочности заполнителем в результате размягчения при длительном контакте с водой, что подтверждается характером разрушения образцов.

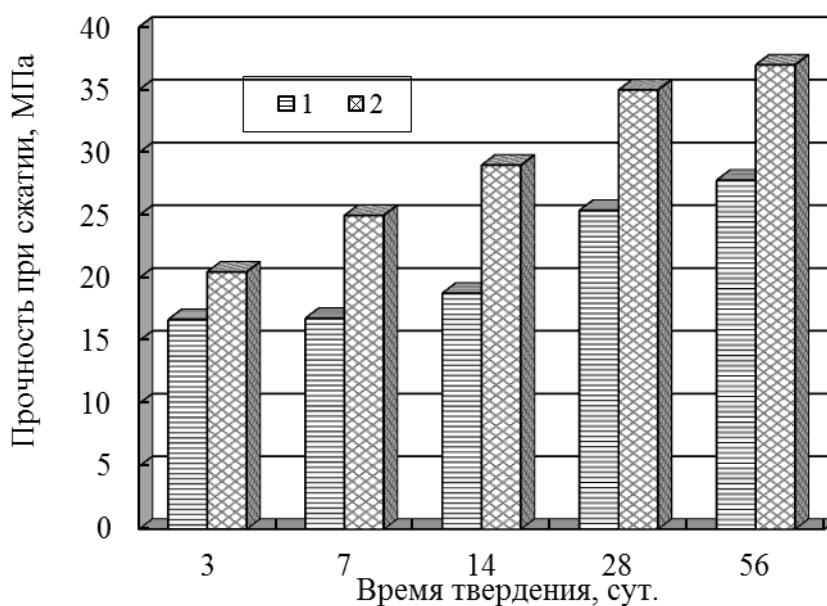


Рисунок 3.2 – Изменение предела прочности при сжатии легкого бетона в процессе твердения в нормальных условиях: 1, 2 – составы бетонных смесей (таблица 3.1).

Средняя плотность бетона состава 2 в высушенном состоянии составляет  $1480 \text{ кг/м}^3$ , таким образом, условие для высокопрочного бетона  $f_{сж}/\rho_0 \geq 25$  на ми-

нимальном 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 большей мере отрицательно сказывается на прочности бетона. При этом дальнейшее повышение прочности матрицы строительного раствора – нецелесообразно, т.к. повышение предела прочности при сжатии легкого бетона незначительное, вследствие низкой прочности пористого заполнителя.

Для достижения более высокой подвижности смеси и обеспечения ее сохранности в течение времени, необходимого для перемешивания, транспортирования и укладки, требуется предварительное водонасыщение пористого заполнителя. Однако при этом происходит снижение прочности как в ранние, так и более поздние сроки твердения. Необходимо в дальнейшем проведение испытаний бетонных смесей и бетонов с частично насыщенным водой заполнителем, а также применение более прочных и водостойких пористых заполнителей.

### **3.2. Влияние частичной замены плотных заполнителей пористыми на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства легких бетонов**

Известно, что характерной особенностью легких бетонов на пористых заполнителях является то обстоятельство, что каждый тип крупного заполнителя позволяет получать бетоны только до определенной прочности, по достижении которой дальнейшее повышение прочности раствора (за счет повышения расхода цемента и снижения водоцементного отношения), не приводит к заметному повышению прочности бетона. Так по данным [137] для получения бетона с прочностью свыше 60 МПа и средней плотностью около 1750 кг/м<sup>3</sup> (ККК=34) применяли высокопрочный керамзит и органо-минеральный модификатор серии МБ.

С другой стороны бетоны с высоким коэффициентом конструктивного качества получены при частичной замене плотного крупного заполнителя пористым ( $K_{KK}=39$ ) [42], хотя при этом средняя плотность бетона остается достаточно высокой –  $2050 \text{ кг/м}^3$ . Дальнейшее снижение средней плотности бетона может быть достигнуто при замене плотного мелкого заполнителя пористым. При этом, в случае высокой пуццолановой активности мелкого заполнителя может быть существенное повышение прочности бетона, обусловленное уплотнением микроструктуры и контактной зоны. Например, по данным [78, 131] отмечен положительный эффект частичной замены плотного песка и цемента комбинированной минеральной добавкой в виде микрокремнезема и золы-уноса.

Исследовали влияние минеральной добавки в виде зольных сфер и керамзитового песка в качестве частичной (полной) замены плотного песка, а также керамзита фракции 5-10 мм – как частичной (полной) замены гранитного щебня, на показатели подвижности бетонных смесей, среднюю плотность и прочность бетона.

Микросферы представляют собой полые зольные шарики размером в среднем от 20 до 500 мкм со сплошными непористыми стенками толщиной от 2 до 10 мкм. Они образуются в топках ТЭС при высокотемпературном факельном сжигании угля. Средняя насыпная плотность микросфер примерно в четыре раза меньше плотности других минеральных наполнителей, однако они имеют высокую механическую прочность.

Сферы обеспечивают минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактную укладку. Коэффициент упаковки микросфер – 60-80% от теоретического. Близкая к идеальной форма микросфер и малый размер частиц обуславливают высокую текучесть смесей на их основе, обеспечивают эффективное заполнение форм, уменьшают усадку.

Предел прочности при сжатии бетонов определяли на образцах-кубах с размером ребра 7,07 см. Подвижность ( $OK$ , мм) / Текучесть ( $D_{распл}$ ) смесей определяли при помощи уменьшенного конуса Абрамса ( $d_1=140$  мм,  $d_2=65$  мм,  $h=215$  мм  $V=2,2$  л.). Состав и свойства бетонных смесей представлены в таблице 3.2.



Бетонные смеси были приготовлены с применением в качестве активной минеральной добавки микрокремнезема в количестве 10% от расхода цемента и характеризовались одинаковыми значениями водоцементного 0,37 и водовяжущего 0,33 отношения. Количество суперпластификатора принято также постоянным – 0,7% от расхода цемента.

Таблица 3.2 – Состав и свойства свежеприготовленных бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>									Свойства бетонной смеси	
	ПЦ	МК	П	В	Щ	КЗП	ЗМС	ПК	СП	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	ОК/Д <sub>расп</sub> , мм
<b>Керамзит 5-10 мм</b>											
1	612	61	788	224	687	0	-	-	4,3	2253	Д <sub>расп</sub> 390
2	612	61	788	224	515	59	-	-	4,3	2137	Д <sub>расп</sub> 310
3	612	61	788	224	343	118	-	-	4,3	2027	ОК 145
4	612	61	788	224	172	177	-	-	4,3	1919	ОК 55
5	612	61	788	224	0	236	-	-	4,3	1732	ОК 25
<b>Микросфера</b>											
6	612	61	591	224	687	-	47	-	4,3	2121	Д <sub>расп</sub> 550
7	612	61	394	224	687	-	94	-	4,3	1996	Д <sub>расп</sub> 530
8	612	61	197	224	687	-	141	-	4,3	1920	Д <sub>расп</sub> 500
9	612	61	0	224	687	-	187	-	4,3	1815	Д <sub>расп</sub> 500
<b>Керамзитовый песок</b>											
10	612	61	591	224	687	-	-	81	4,3	2121	Д <sub>расп</sub> 530
11	612	61	394	224	687	-	-	163	4,3	2111	Д <sub>расп</sub> 500
12	612	61	197	224	687	-	-	244	4,3	2011	ОК 14,5
13	612	61	0	224	687	-	-	326	4,3	1920	ОК 12,5
<b>Керамзит + Микросфера/ Керамзитовый песок</b>											
14	612	61	394	224	515	59	94	-	4,3	1892	Д <sub>расп</sub> 530
15	612	61	394	224	515	59	-	163	4,3	1924	Д <sub>расп</sub> 500

Частичная (полная) замена крупного заполнителя керамзитом фракции 5-10 мм в количестве 25, 50, 75 и 100% по объему (таблица 3.2 составы № 1-5) приводит к снижению средней плотности от 5 до 23%, соответственно, и к снижению предела прочности при сжатии на 16,8-45,5% от контрольного (рисунок 3.3 а,б). Кроме того, введение пористого заполнителя в количестве 50% и более (составы № 3-5) оказывает существенное влияние на подвижность бетонных смесей вследствие поглощения части воды затворения пористым заполнителем. Так, введение более 50% керамзита фракции 5-10 мм снижает подвижность смеси от 145 мм до 25 мм.

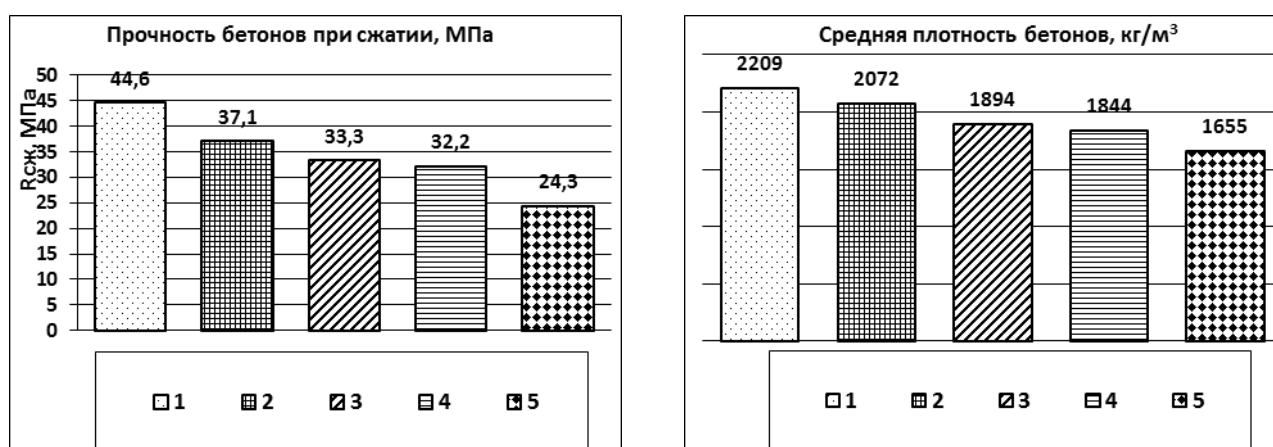


Рисунок 3.3 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой гранитного щебня керамзитом

При замене мелкого заполнителя – кварцевого песка, зольными микросферами в количестве 25, 50, 75, 100% по объему (таблица 3.2 составы № 6-9) также наблюдается снижение средней плотности бетонов на 6,8-19,3% соответственно, однако прочность при сжатии в 28-суточном возрасте возрастает на 61,8-5,6% (рисунок 3.4 а,б). Это связано с высокой пуццолановой активностью зольных микросфер, а также формой их частиц, которые обеспечивают минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактную укладку.

При замене плотного кварцевого песка пористым керамзитовым в количестве 25, 50, 75, 100% по объему (таблица 3.2 составы № 10-13) также наблюдается снижение средней плотности бетонов от 4,5 до 15,1% (рисунок 3.5), а бетоны ха-

рактируются пределом прочности при сжатии от 48,7 (при 100% замене плотного песка пористым) до 71,5 МПа (25% керамзитового песка), что на 9,2% и 60,3% соответственно выше от контрольного состава № 1 (таблица 3.2).

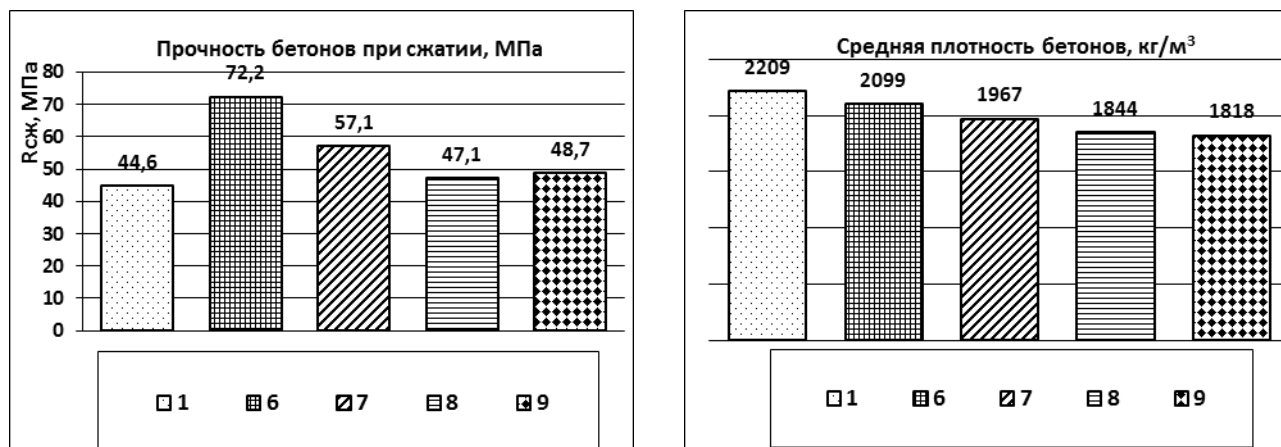


Рисунок 3.4 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка зольными микросферами

Бетонные смеси с заменой кварцевого песка керамзитовым характеризуются высокой начальной подвижностью, однако она резко уменьшается с увеличением доли пористого мелкого заполнителя вследствие его водопоглощения. Так, при 50% замене мелкого заполнителя бетонная смесь имеет высокую текучесть, характеризующуюся диаметром расплыва конуса более чем 500 мм, тогда как начальная подвижность бетонных смесей с 75% 100% заменой мелкого заполнителя характеризуются осадкой конуса 145 и 125 мм, соответственно.

Более высокие значения показателя предела прочности при сжатии бетонов с керамзитовым песком по сравнению с контрольным составом вероятно можно связать с уменьшением эффективного водоцементного отношения вследствие поглощения пористым заполнителем части воды затворения, которая постепенно будет доступна для внутреннего ухода в последующей гидратации цемента.

Исходя из полученных данных о влиянии мелких пористых заполнителей в виде зольных микросфер и керамзитового песка при замене плотного песка в количестве 50% (состав № 7, № 11, соответственно) рассмотрена возможность снижения средней плотности этих бетонов путем одновременной замены гранитного

щебня керамзитовым в количестве 25% по объему (таблица 3.2 составы № 14-15) (рисунок 3.6).

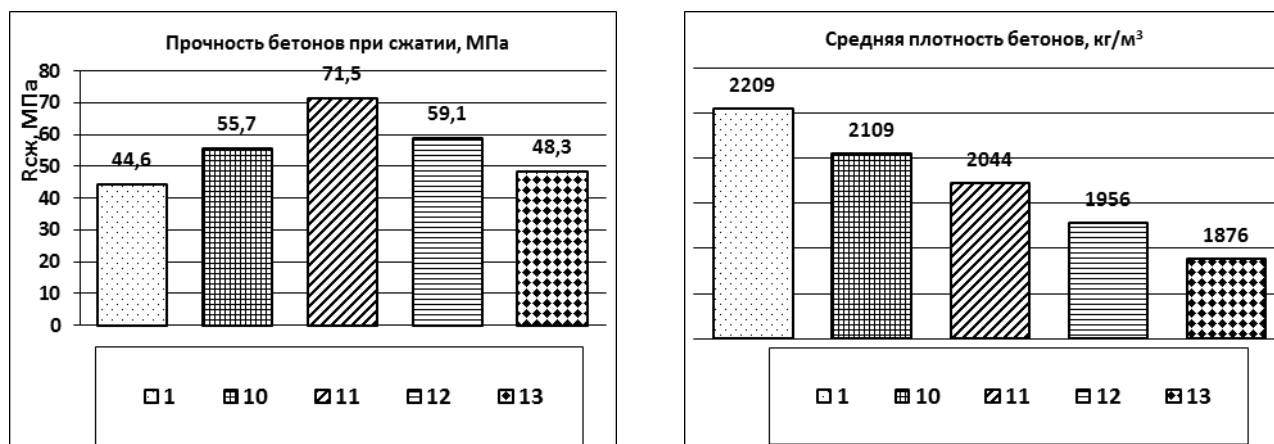


Рисунок 3.5. – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка керамзитовым

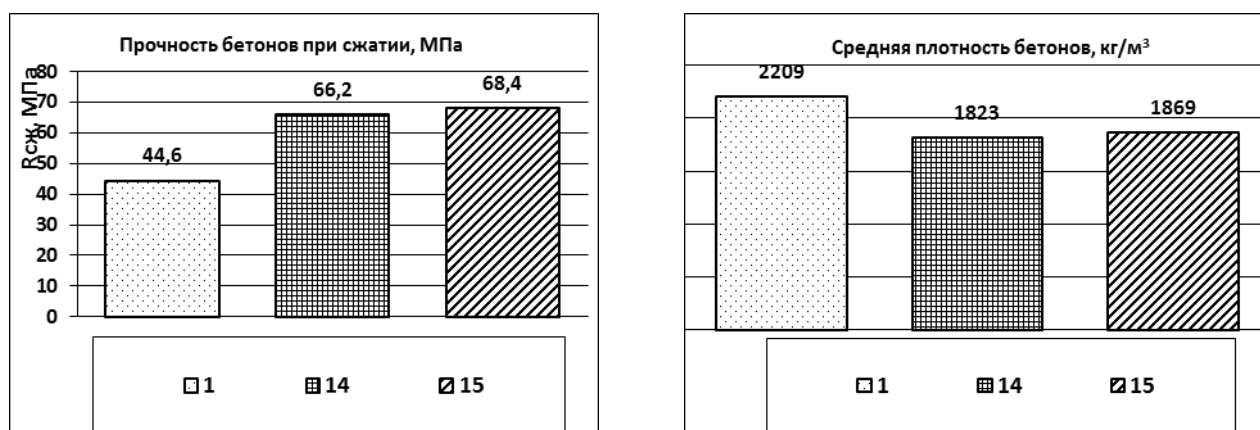


Рисунок 3.6. – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) бетонов с заменой кварцевого песка зольными микросферами и керамзитовым песком, гранитного щебня – керамзитовым

Бетонные смеси имеют высокую подвижность, характеризующуюся диаметром расплыва конуса более чем 500 мм, однако, в случае использования керамзитового песка в количестве 50% как замены плотного кварцевого в комбинации с 25% керамзитового гравия фракции 5-10 мм, как замены гранитного щебня (состав № 15) наблюдается также потеря подвижности бетонной смеси во времени. Потеря подвижности связана, в первую очередь, с поглощением воды затворе-

ния 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.

Таким образом, установлено, что частичная (полная) замена плотных крупных и мелких заполнителей пористыми позволяет получать легкие бетоны характеризующихся средней плотностью от 1553 до 1869 кг/м<sup>3</sup> и показателями предела прочности при сжатии от 35,6 до 66,8 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения, коэффициентом конструктивного качества – ККК 23-35. При этом в качестве пористых заполнителей бетона использованы рядовой низкомарочный керамзит и отход промышленности – зольные микросферы. При этом бетонные смеси характеризуются довольно высокой начальной подвижностью. Однако, в процессе выдержки смесей наблюдается дальнейшая резкая потеря подвижности, вследствие водопоглощения пористого заполнителя. Необходимо в дальнейшем прогнозировать величину водопоглощения заполнителя в твердеющей цементной пасте для расчета количества воды, которое необходимо добавить в бетонную смесь для компенсации потери подвижности.

### **3.3. Водопоглощение пористого заполнителя в твердеющей цементной пасте**

В последние годы концепция внутреннего ухода является одним из способов повышения долговечности высокопрочных бетонов [119]. Введение предварительно водонасыщенного пористого заполнителя, как внутренний уход за бетоном, в первую очередь предусматривает снижение риска его трещинообразования в раннем возрасте, вызванного аутогенной усадкой бетона [94, 100, 128, 130, 143-144]. Однако, как отмечается в [110], внутренний уход также снижает вероятность

трещинообразования бетона вследствие его усадки при высыхании, увеличивает морозостойкость и коррозионную стойкость бетонов [114].

Как известно [98], в процессе гидратации цемента при отсутствии доступа внешней влаги в тонких капиллярах возникают мениски, обезвоживание которых создает большие внутренние напряжения – развивается аутогенная усадка. Если химическая усадка обусловлена внутренним изменением объема в твердеющей системе, сопровождающимся образованием в структуре гелевых пор (контракция), то аутогенная усадка – это изменение внешнего объема структуры, которое происходит в замкнутых условиях (без потери влаги в окружающую среду, как в случае с влажностной усадкой). В пластичном бетоне она происходит потому, что объем продуктов гидратации цемента меньше, чем объем цемента и воды до гидратации (процесс, называемый химической усадкой) [111].

Предварительно водонасыщенный пористый заполнитель используется как водный резервуар в составе бетонов с низким водоцементным отношением. В процессе гидратации цемента влага из более крупных пор заполнителя будет мигрировать в твердеющую систему.

По оценке различных исследователей количество воды, необходимое для внутреннего ухода, будет зависеть от состава бетона, внешних условий твердения и колеблется в пределах от 20 до 40 л/м<sup>3</sup>. Так, например, в статье [118] получен легкий бетон с теоретическим количеством воды для внутреннего ухода около 20 л/м<sup>3</sup>. Однако в этом случае аутогенная усадка бетона не была компенсирована. Согласно исследованиям [93] теоретически минимальное количество воды внутреннего ухода должно быть не менее 40 л/м<sup>3</sup>.

Согласно [115] необходимое количество пористого заполнителя для внутреннего ухода за бетоном можно определить как:

$$M_{LWA} = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{max}}{S \cdot W_{LWA}} \quad (3.1)$$

где:  $M_{LWA}$  (кг/м<sup>3</sup>) – расход пористого заполнителя (в сухом состоянии) для водонасыщения, необходимого для заполнения пустот, образующихся вследствие химической усадки;  $C_f$  (кг/м<sup>3</sup>) – содержание цемента в бетоне;  $CS$  (мл воды / 1 г це-

мента) – химическая усадка цемента;  $\alpha_{\max}$  (0-1) – предполагаемая максимальная степень гидратации цемента;  $W_{LWA}$  (кг воды / кг сухого заполнителя) – водопоглощение пористого заполнителя;  $S$  – предполагаемая степень водонасыщения пористого заполнителя, выражаемая как функция водопоглощения заполнителя.

Однако в данном уравнении нет четкой ясности, как оценивать значения степени водонасыщения пористого заполнителя, которое варьируется от 0 до 1.

Еще один способ для расчета необходимого количества пористого заполнителя представлен в [145], где более детально описана степень водопоглощения пористого заполнителя:

$$M_{LWA} = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\max}}{t^a \cdot \gamma_{LWA24ч} \cdot \psi}, \quad (3.2)$$

где:  $t^a$  – водопоглощение заполнителя, как функция времени относительно значения его водопоглощения за 24 ч.,  $\psi$  – количество воды, выходящей из пористого заполнителя при высокой относительной влажности

Однако все эти методы основаны на применении предварительно водонасыщенного пористого заполнителя, что существенно увеличивает трудоемкость, а также усложняет технологический процесс производства бетонной смеси.

Наиболее простым, с технологической точки зрения, способом компенсации потери влаги в бетоне вследствие ее поглощения пористым заполнителем является введение избыточного количества воды затворения с превышением исходной подвижности по отношению к заданной. Как показано в [79], при введении избыточного количества воды затворения с превышением исходной подвижности по отношению к заданной, поглощаемая пористым заполнителем избыточная часть воды затворения не сказывается на величине истинного В/Ц и не снижает прочность бетона.

Наиболее интенсивно процесс поглощения воды пористым заполнителем происходит в первые 10-15 минут после приготовления бетонной смеси. Обычно величина водопоглощения пористого заполнителя в бетонной смеси на 30-50% ниже его водопоглощения в воде, т.к. на это оказывает влияние водоудерживающая способность цементного теста [79].

Для решения этой задачи разработана методика, заключающаяся в следующем. На первом этапе необходимо определить, в течение какого времени при выдерживании бетонной смеси пористый заполнитель поглощает воду из смеси. Однако при этом, исключить потерю подвижности бетонной смеси вследствие прогрессирующей гидратации цемента, формирования новообразований с очень высокой удельной поверхностью и адсорбцией на них суперпластификатора.

Для этого была приготовлена бетонная смесь состава 15 (таблица 3.2), в которую введена добавка-замедлитель твердения – сульфат меди (СМ, 0,05 % от массы цемента), которая будет нивелировать потерю подвижности бетонной смеси из-за процессов, связанных с гидратацией цемента, и потеря подвижности будет происходить только вследствие поглощения части воды пористым заполнителем. Окончательный состав бетона представлен в таблице 3.3.

В процессе выдерживания готовой бетонной смеси в течение 120 мин. определяли ее подвижность с интервалом 15 мин.

Таблица 3.3 – Состав бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>									
	ПЦ	МК	П	В	Щ	КЗП	ЗМС	ПК	СП	СМ
15 <sup>†</sup>	612	61	394	224	515	59	-	163	4,3	0,3

Наиболее интенсивно потери подвижности бетонной смеси с замедлителем твердения происходят в первые 30 минут и практически стабилизируются к 120 минутам (рисунок 3.7). При этом, можно утверждать, что в этом случае потери подвижности бетонной смеси 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 3.7).



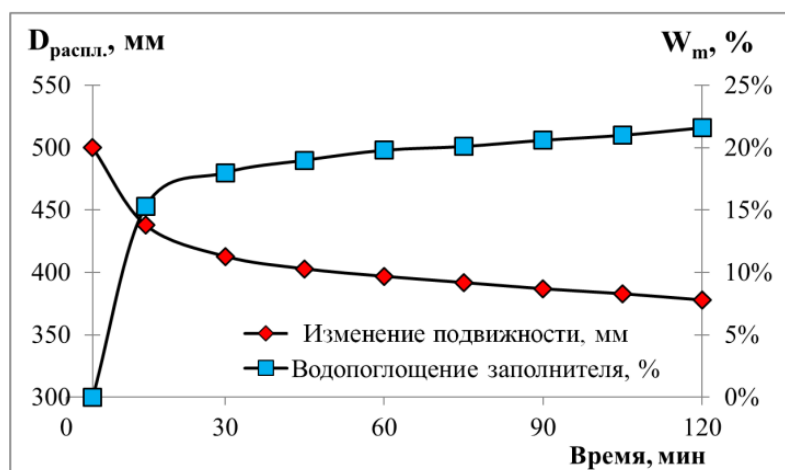


Рисунок 3.7 – Изменение подвижности бетонной смеси с замедлителем твердения и кинетика водопоглощения керамзита в воде

Для определения водопоглощения пористого заполнителя в твердеющей цементной системе можно воспользоваться методикой измерения химической усадки цементных паст по объемному методу, описанному в ASTM C1608-07 "Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste".

В предварительно взвешенную стеклянную колбу помещали цементную пасту, идентичную по содержанию компонентов бетонной смеси состава 15, с соответствующей порцией керамзитового песка фракции 0,315-1,25 мм (таблица 3.4). После взвешивания колбу заливали дистиллированной водой, плотно закрывали резиновой пробкой со вставленным мерным капилляром (рисунок 2.3).

Массу керамзита в колбе уточняли после окончания эксперимента путем промывки исследуемой пробы на сите № 0,315 мм, с последующим высушиванием и взвешиванием.

Таблица 3.4 – Состав цементных паст с керамзитовым песком ("микробетон")

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

\*Примечание:  $V/V = V / (ПЦ + МК)$

Образец "микробетона" (состав № 1) с добавкой замедлителя твердения интенсивно поглощает воду в течение 120 минут с последующей стабилизацией к 240 минутам (рисунок 3.8), 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 органо-минеральными добавками, составляет 9,8% – 47% от величины водопоглощения в обычной воде за аналогичный промежуток времени.

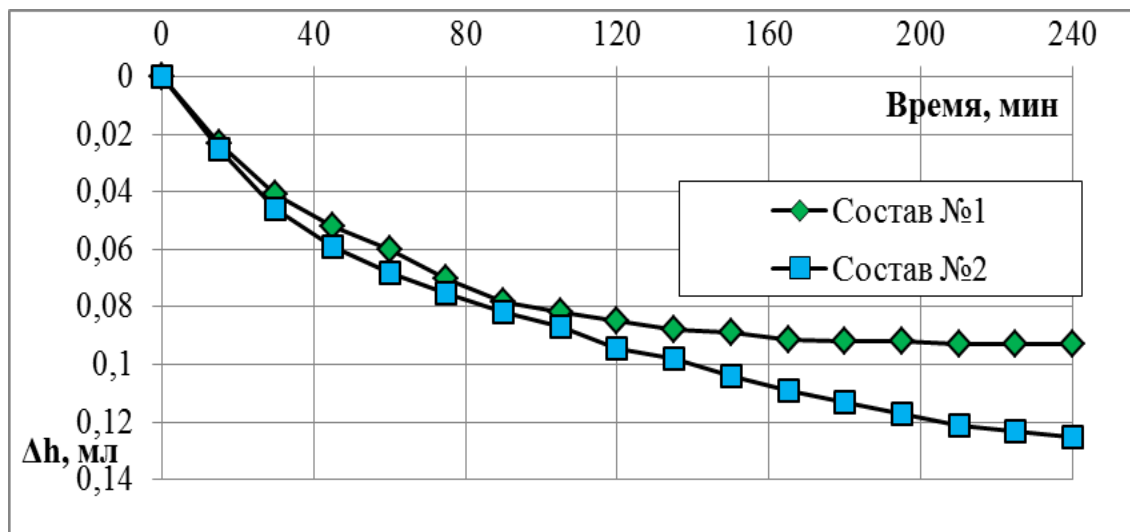


Рисунок 3.8 – Изменение высоты водяного столбика в капилляре в процессе твердения цементных систем

Таким образом, установлено, что сухой пористый заполнитель поглощает значительное количество воды затворения, что в свою очередь ухудшает технологические свойства смесей и увеличивает трудоемкость при их изготовлении и дальнейшей укладке.

В дальнейшем необходимо определить влияние дополнительного количества воды затворения на технологические свойства бетонных смесей и физико-механические свойства легких бетонов.

### **3.4. Влияние дополнительного количества воды затворения для восстановления подвижности бетонных смесей на физико-механические свойства легких бетонов**

С целью сохранности заданного В/Ц отношения, а также подвижности смеси вводили дополнительную воду затворения для восстановления подвижности бетонных смесей. В этом случае логично предположить, что введение дополнительного количества воды затворения может оказывать существенное влияние как на показатель средней плотности бетонной смеси и бетонов, так и на прочностные показатели легких бетонов.

В качестве пористого заполнителя использовали керамзит компании Leca® фракций: 2-4 мм; и 4-8 мм с круглой формой зерен.

Было приготовлено восемь составов бетонных смесей с одинаковым расчётным В/Ц и с различным дополнительным количеством воды затворения – 10, 15 и 25% от массы пористого заполнителя. Составы и основные свойства легкобетонных смесей приведены в таблице 3.5. Прочность бетонов при сжатии определяли на образцах цилиндрах размерами 60×120 мм [52].

Введение дополнительного количества воды затворения в состав легкобетонной смеси приводит к повышению предела прочности при сжатии легких бетонов и практически не влияет на показатели средней плотности легких бетонов.

Так, введение в бетонную смесь с заполнителем фракции 2-4 мм (состав № 3) 15% дополнительной воды затворения – приводит к повышению прочности при сжатии на 21,5% ( $R_{сж}=55,9$  МПа) по сравнению с составом № 1 ( $R_{сж}=46$  МПа.). Дальнейшее увеличение дополнительного количества воды затворения приводит к снижению прочности бетонов при сжатии (рисунок 3.9 а). Вероятно, это происходит вследствие увеличения эффективного значения В/Ц отношения. При этом введение дополнительного количества воды затворения практически не влияет на показатели средней плотности бетонов, они находятся в пределах от 1876 до 1884 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 3.9 б).

Таблица 3.5 – Составы и основные свойства легкобетонных смесей

№		В/Ц	Расход компонентов (кг/м <sup>3</sup> )							Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
			Ц	МК	В	В'	П	КЕР	СП	
1	ГК 40%, 2-4 мм	0,25	667	100	159	-	467	300	8	1890
2	ГК 40%, 2-4 мм (+10% воды)	0,25	667	100	159	16	467	300	8	1892
3	ГК 40%, 2-4 мм (+15% воды)	0,25	667	100	159	24	467	300	8	1898
4	ГК 40%, 2-4 мм (+25% воды)	0,25	667	100	159	40	467	300	8	1904
5	ГК 40%, 4-8 мм	0,25	667	100	159	-	467	300	8	1887
6	ГК 40%, 4-8 мм (+10% воды)	0,25	667	100	159	16	467	300	8	1889
7	ГК 40%, 4-8 мм (+15% воды)	0,25	667	100	159	24	467	300	8	1894
8	ГК 40%, 4-8 мм (+25% воды)	0,25	667	100	159	40	467	300	8	1897

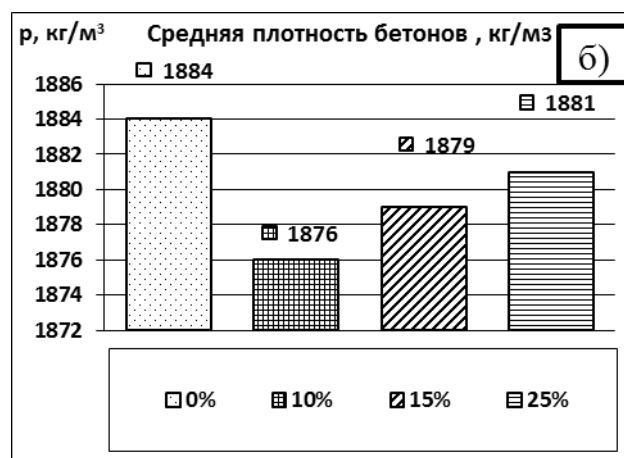
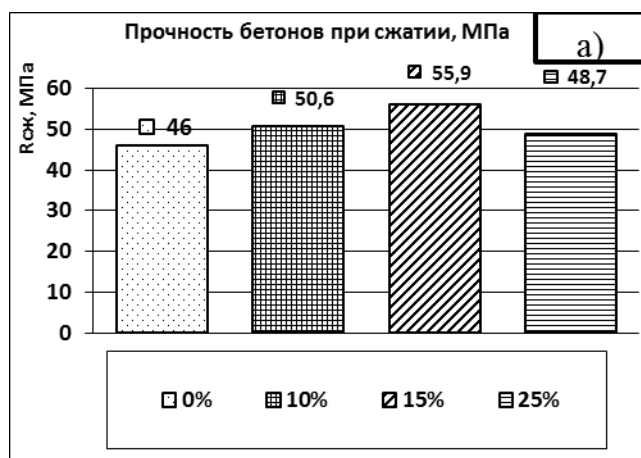


Рисунок 3.9 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) легких бетонов с пористым заполнителем фракции 2-4 мм, составы № 1-4 (таблица 3.4) в зависимости от количества дополнительной воды затворения

Однако в бетонах с пористым заполнителем фракции 4-8 мм наблюдается другая тенденция: наибольшее значение предела прочности при сжатии получено для состава № 6 (таблица 3.4) при введении 10% дополнительной воды затворения. Прочность в этом случае составляет 48,6 МПа, что на 23,6% больше, чем бетона состава № 5 ( $R_{сж}=39,3$  МПа) (при введении пористого заполнителя без дополнительного количества воды затворения). Дальнейшее увеличение содержания дополнительного количества воды затворения также приводит к снижению прочности бетонов при сжатии (рисунок 3.10 а). Показатели средней плотности легких бетонов с пористым заполнителем фракции 4-8 мм находятся в пределах от 1833 до 1887 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 3.10 б).

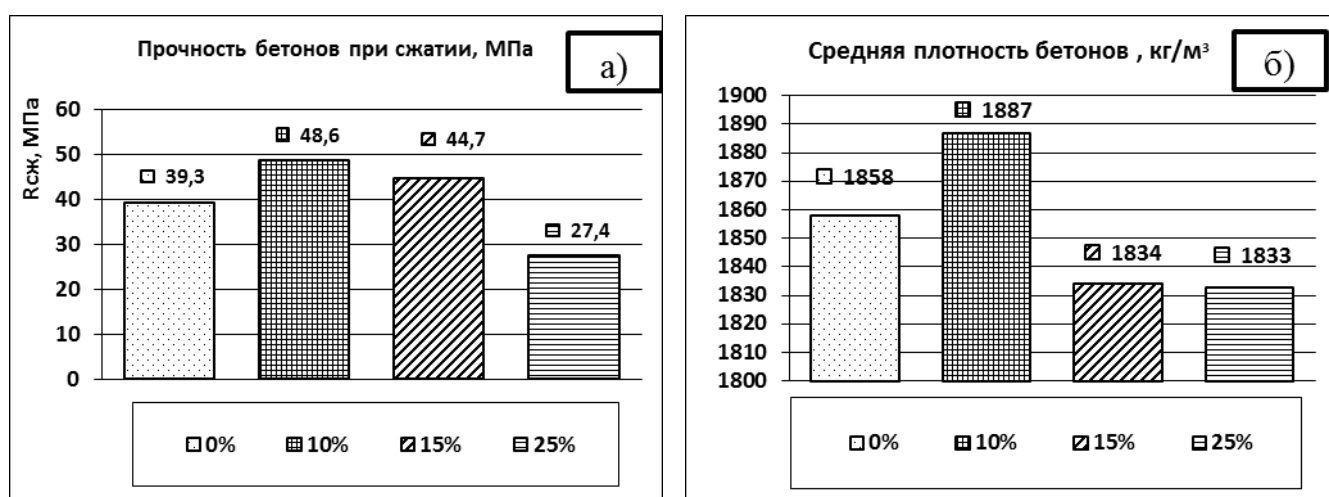


Рисунок 3.10 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) легких бетонов с пористым заполнителем фракции 4-8 мм, составы № 5-8 (табл. 3.4) в зависимости от количества дополнительной воды затворения

По данным СЭМ (рисунок 3.11) в контактной зоне "пористый заполнитель-цементный камень" определено, что пористый заполнитель поглощает только воду затворения.

При использовании технологии введения дополнительного количества воды затворения с целью обеспечения сохраняемости подвижности бетонных смесей необходимо учитывать свойства пористых заполнителей (среднюю плотность, пористость, кинетику водопоглощения).

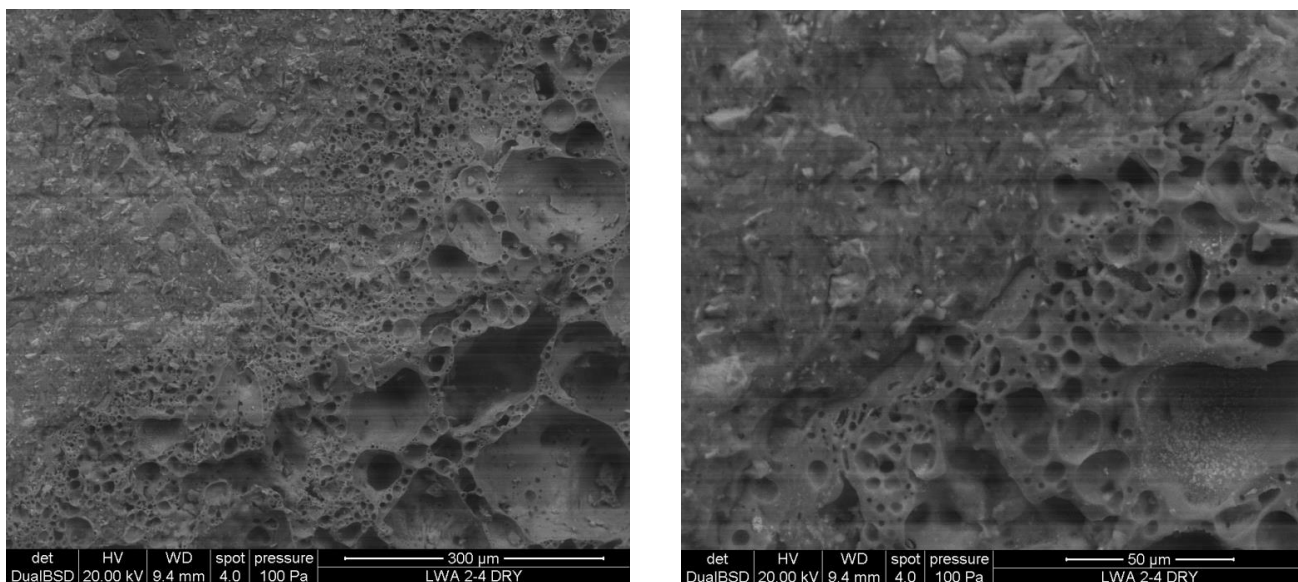


Рисунок 3.11 – СЭМ образцов бетона в контактной зоне "пористый заполнитель-цементный камень"

Таким образом, получены составы конструкционного легкого бетона с повышенным коэффициентом конструктивного качества ( $KKK=26-30$ ), характеризующиеся пределом прочности при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения 49-56 МПа и средней плотностью в сухом состоянии 1879-1887 кг/м<sup>3</sup>. Такой бетон может найти эффективное применение в ограждающих конструкциях высотных зданий и сооружений.

Необходимо в дальнейшем проведение испытаний легких бетонов на деформационные характеристики и определение кинетики изменения внутренней влажности бетонов в процессе их твердения.

### Выводы по разделу 3

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

2. 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/м<sup>3</sup>, коэффициентом конструктивного качества ККК=31/28.

3. 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 легкобетонной 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.

4. При использовании технологии введения дополнительного количества воды затворения с целью сохранения подвижности необходимо учитывать свойства пористых заполнителей (среднюю плотность, пористость, кинетику водопоглощения). При использовании такой технологии возможно получение высокопрочных легких бетонов с повышенным коэффициентом конструктивного качества (ККК=26-30), характеризующиеся пределом прочности при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения 49-56 МПа и средней плотностью в сухом состоянии 1879-1887 кг/м<sup>3</sup>.

## РАЗДЕЛ 4

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГКИХ  
БЕТОНОВ****4.1. Аутогенная усадка и внутренний уход конструкционных легких бетонов**

В процессе приготовления легкобетонной смеси пористые заполнители обычно предварительно перемешивают с водой перед добавлением цемента. Так, в работе [146] сообщается, что примерно шесть литров дополнительной воды на кубический метр легкого бетона необходимо для повышения подвижности на 25 мм. Таким образом, это обычная практика – предварительно водонасыщать пористые заполнители перед их дозированием [147]. В то же время, в лабораторных условиях, обычно используется предварительное замачивание заполнителя в течение 24 ч перед смешиванием. Однако в реальных условиях ведения строительства предварительное водонасыщение пористых заполнителей не всегда практично.

Многие производители готового товарного бетона, как правило, предварительно смачивают заполнитель на складах хранения путем разбрызгивания на него воды. Некоторые заводы используют технологию предварительного вакуумного водонасыщения пористых заполнителей, при этом заполнитель характеризуется высокой и регулируемой влажностью [125].

В некоторых случаях для предотвращения потери удобоукладываемости бетонных смесей применяется метод отсроченного добавления воды затворения непосредственно перед укладкой бетонной смеси на строительной площадке.

При использовании сухого пористого заполнителя эффект потери подвижности бетонной смеси может быть компенсирован введением избыточного количества воды затворения от исходной подвижности. В этом случае избыток воды



затворения поглощается пористым заполнителем, не влияет на величину эффективного В/Ц отношения и не снижает прочность бетона.

Выполнены исследования влияния пористого заполнителя в сухом, водонасыщенном состоянии, а также количества дополнительной воды затворения на показатели легкогобетонной смеси и бетона – удобоукладываемость смеси, сохранность подвижности, объем вовлеченного воздуха, изменение внутренней влажности в процессе твердения, аутогенную усадку, среднюю плотность и предел прочности при сжатии.

В качестве вяжущего использован портландцемент (ПЦ) завода Aalborg (Дания) СЕМ I-52,5N (активность 625 кгс/см<sup>2</sup>; нормальная густота 24,5%), активной минеральной добавки – микрокремнезем (МК) Elkem Microsilica (Норвегия). Песок кварцевый (П) с показателем модуля крупности  $M_k=2,75$ . В качестве крупного пористого заполнителя использовали гравий керамзитовый (ГК) компании Leca (Дания) фракции 4-8 мм с округлой формой зерен (насыпная плотность 385 кг/м<sup>3</sup>, средняя плотность зерна 710 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение в течение 24 часов – 28,6%). В качестве суперпластификатора (СП) использована добавка Sika Viscocrete-2300 HE.

Было приготовлено четыре состава бетонов: состав № 1 – цементно-песчаный раствор с В/Ц отношением 0,25; в составах № 2, 3, 4 часть раствора (40% по объему) была заменена пористым заполнителем в водонасыщенном состоянии (состав № 2), сухом состоянии (состав № 4), сухом состоянии, с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3).

Согласно [100] количество воды в литрах на 1 м<sup>3</sup> бетона для внутреннего ухода можно определить по следующей формуле:

$$V_{\text{wat}} (\text{м}^3 \text{ воды} / \text{м}^3 \text{ бетона}) = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\text{max}}}{\rho}, \quad (4.1)$$

где:  $C_f$  (кг/м<sup>3</sup>) – содержание цемента в смеси,  $CS$  (0,06 кг воды на 1 кг цемента) – химическая усадка цемента,  $\alpha_{\text{max}}$  – максимальная степень гидратации цемента (0-1),  $\rho$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>). Для бетонов с В/Ц отношением ниже 0,40 це-

мент не гидратирует полностью, и максимальное значение степени гидратации можно определить как  $(В/Ц)/0,40 [100]$ .

Согласно формуле (4.1) объем дополнительной воды для состава № 4 составляет  $0,025 \text{ м}^3$ . Состав бетонных смесей представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Состав бетонных смесей

№	Состав	ПЦ, кг/м <sup>3</sup>	МК, кг/м <sup>3</sup>	П, кг/м <sup>3</sup>	В, л/м <sup>3</sup>	ГК, кг/м <sup>3</sup>	СП, л/м <sup>3</sup>	Воздух, %
1	ГК 0%	1113	167	779	250	-	13,4	4,5
2	ГК 40% (водонасыщенный)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
3	ГК 40% (сухой, гидрофоб.)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
4	ГК 40% (сухой+15% дополн. воды)	667	100	467	159+25	300	8,0	4,3

Технологические свойства бетонных смесей, в частности подвижность и ее потерю во времени определяли по диаметру расплыва стандартного конуса Абрамса. Диаметр расплыва бетонной смеси измеряли каждые 20 минут после перемешивания на горизонтальной поверхности в двух перпендикулярных направлениях. За показатель подвижности принимали среднее значение.

Для определения механических свойств бетона, в частности предела прочности при сжатии были изготовлены по девять образцов цилиндрической формы размерами 60×120 мм для каждого состава. После 24 часов твердения образцы были расформованы и твердели при постоянной температуре +30°C без обмена влагой с окружающей средой. Предел прочности при сжатии определяли в возрасте 1, 7 и 14 суток твердения согласно [138].

Кинетику изменения внутренней влажности (ВВ) бетонов определяли на станции Rotronic hygrosopic DT в течение 14 суток твердения образцов без обмена влагой с окружающей средой при постоянной температуре +30°C.

Аутогенная усадка (АУ) измерялась с помощью автоматизированного дилатометра конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена [139]. Бетонную смесь, после перемешивания заливали в гофрированную поливинилхлоридную трубу длиной приблизительно 350 мм и внутренним диаметром 82 мм. Образцы твердели в бассейне с полигликолем в течение 14 суток твердения образцов без обмена влагой с окружающей средой при постоянной температуре +30°C. Измерение деформаций проводились с помощью электронного индикатора TRANS-ТЕК серии 305 с точностью до 0,003 мм.

Показатель подвижности бетонных смесей и потерю ее во времени исследовали в течение 60 минут после перемешивания. Как видно из рисунка 4.1, все бетонные смеси теряют подвижность в течение 60 минут. Состав № 2, в котором пористый заполнитель предварительно водонасыщен, характеризуется минимальным значением потери подвижности – около 7%. Вода затворения не поглощается пористым заполнителем, и небольшое значение потери подвижности связано, вероятнее всего, с адсорбцией суперпластификатора на поверхности продуктов гидратации вяжущего вещества.

При введении дополнительного количества воды затворения (15% - состав № 4) начальная подвижность бетонной смеси аналогична подвижности состава № 2. Однако, потеря подвижности через 60 минут составила 24%. Это свидетельствует о значительном поглощении пористым заполнителем воды затворения. Теоретически, согласно кинетике водопоглощения в течение 24 часов в воде пористый заполнитель за три часа (соответствует времени конца схватывания цементной пасты) поглощает около 23% воды. Следовательно, 300 кг пористого заполнителя способно поглотить 69 литров воды. Соответственно, объем дополнительной воды затворения в количестве 25 литров, необходимый для внутреннего ухода бетона, не достаточен для компенсации потери подвижности бетонной смеси.

При введении сухого заполнителя с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3) потеря подвижности составляет 17%, что указывает на то, что гид-

рофобная пленка на поверхности зерна заполнителя не полностью блокирует проникновение влаги внутрь зерна.

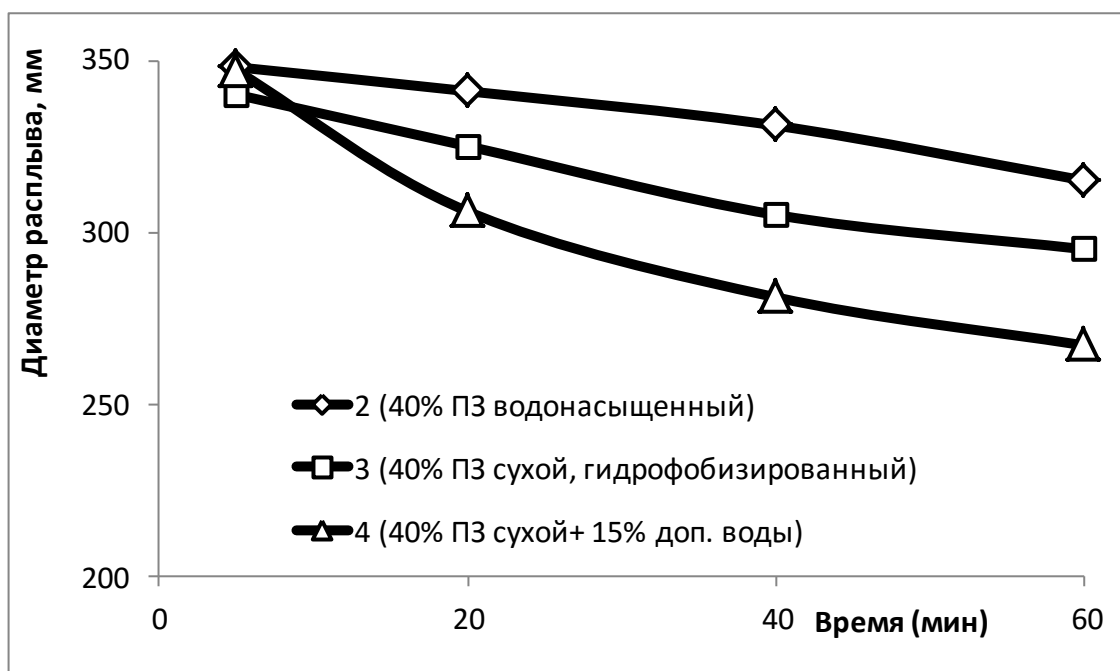


Рисунок 4.1 – Изменение подвижности бетонных смесей в процессе выдержки после приготовления

Как видно из рисунка 4.2, значительное увеличение аутогенной усадки (АУ) бетона состава № 1 приходится на время твердения системы от 5 до 24 часов, когда деформации достигают значения 2200 мкм/м. В тот же период твердения наблюдается резкое падение значения внутренней влажности (ВВ) системы со 100% до 93% (рисунок 4.3). Дальнейшее уменьшение внутренней влажности системы (период между 2 и 5 сутками) несколько стабилизируется. Однако, в возрасте 14 суток величина внутренней влажности цементной системы снижается до значения 80%. Одновременно, с уменьшением значения внутренней влажности происходит увеличение величины аутогенной усадки раствора до 2600 мкм/м. Таким образом, большая часть аутогенной усадки раствора, вызванной внутренним самовысушиванием, развиваются в течение первых семи суток гидратации.

Следовательно, можно предположить, что для предотвращения в конструкционных легких бетонах микротрещинообразования в раннем возрасте вследствие развития аутогенной усадки, должны быть предприняты меры, которые будут эффективными, по крайней мере, в течение одной недели твердения.

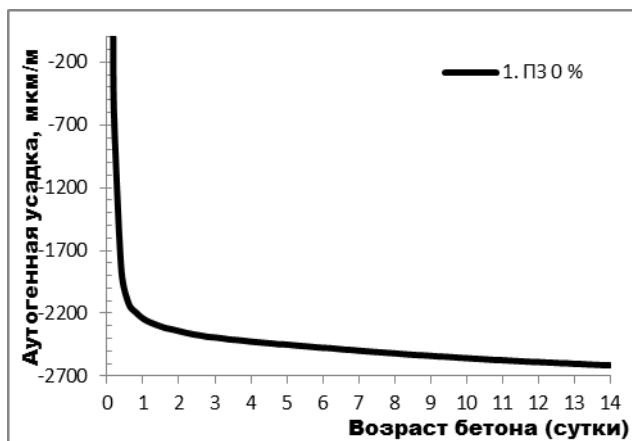


Рисунок 4.2 - Изменение аутогенной усадки бетона во времени

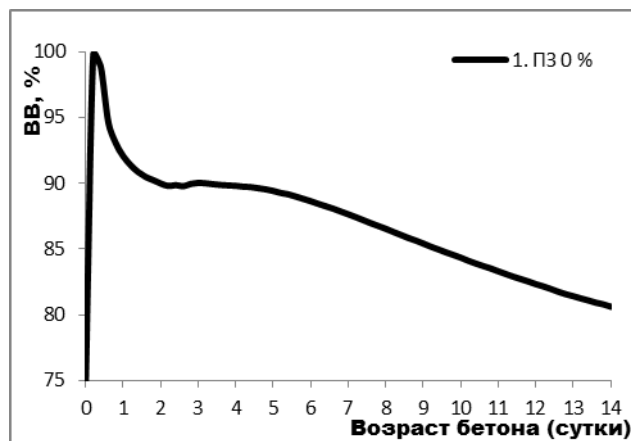


Рисунок 4.3 - Изменение внутренней влажности бетона во времени

Как следует из данных рисунка 4.4, при замене части раствора пористым заполнителем, во всех случаях в начальный период твердения (48 часов) происходит небольшое расширение системы в результате сжимающих напряжений, с последующим развитием усадки и растягивающих напряжений в составах № 3 и № 4. Однако, в составе № 2, при использовании предварительно водонасыщенного пористого заполнителя, даже в возрасте 14 суток наблюдается расширение системы. Следует отметить, что в этот период бетон сохраняет значение относительной влажности в пределах 97-96,6% (рисунок 4.5). В то время, когда механизм внутреннего ухода, способствующий снижению аутогенной усадки, достаточно хорошо известен, механизмы, приводящие к расширению системы в раннем возрасте, изучены не так детально. Расширение, скорее всего, вызвано давлением кристаллов этtringита либо набуханием гелиевых продуктов гидратации, которые, как правило, рассматривают как основные причины расширения системы в раннем возрасте [136]. Таким образом, аутогенная усадка полностью предотвра-

щается в конструкционном легком бетоне при использовании предварительно водонасыщенных пористых заполнителей.

При замене части раствора сухими пористыми заполнителями (составы № 3, 4), аутогенная усадка достигает значения 160 и 100 мкм/м, соответственно. Постепенное увеличение аутогенной усадки с 3 по 14 сутки твердения сопровождается уменьшением значения внутренней влажности бетонов в пределах от 93-95% до 81-83%.

Гидрофобизация поверхности керамзитового гравия (состав № 3) не устраняет проблемы развития аутогенной усадки. С другой стороны, введение дополнительной воды затворения также не решает полностью эту проблему, однако значение аутогенной усадки  $-100 \times 10^{-6}$  не является критичным для развития раннего трещинообразования, вероятность которого является наибольшей, когда отношение усадочных напряжений к пределу прочности при растяжении цементного камня достигает максимума (12-36 часов) [77].

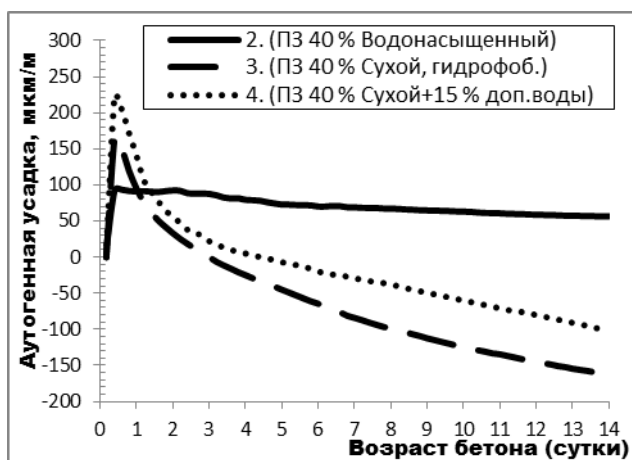


Рисунок 4.4. - Изменение аутогенной усадки легких бетонов во времени

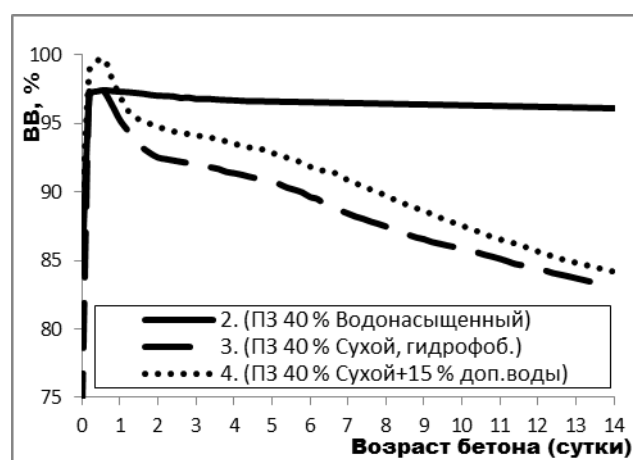


Рисунок 4.5. - Изменение внутренней влажности легких бетонов во времени

Частичная замена раствора (состав № 1) пористым заполнителем значительно снижает показатели предела прочности при сжатии бетона. Наибольшее значение предела прочности при сжатии легкого бетона наблюдается при введении предварительно водонасыщенного пористого заполнителя (состав № 2). Легкий

бетон с дополнительной водой затворения (состав № 4) характеризуется более высокими значениями прочности в раннем возрасте (рисунок 4.6).

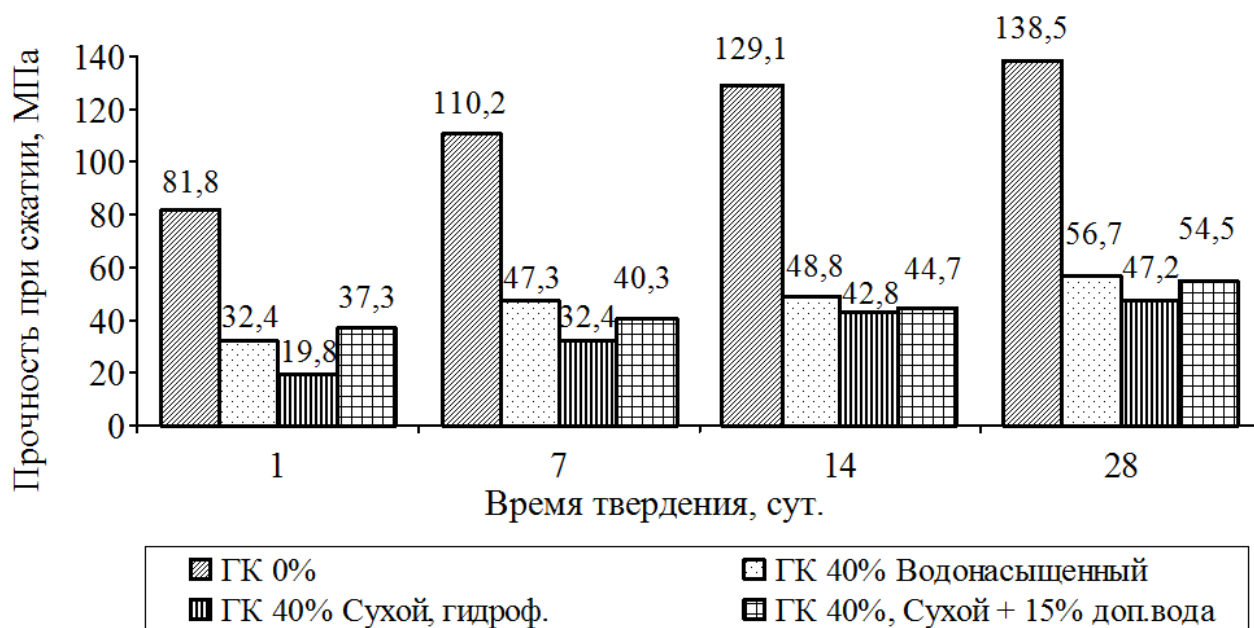


Рисунок 4.6 – Кинетика роста предела прочности при сжатии бетонов

Таким образом, введение дополнительной воды затворения в бетон с сухими пористыми заполнителями не предотвращает потерю подвижности бетонной смеси в течение 60 минут после перемешивания, однако способно минимизировать развитие аутогенной усадки бетона, особенно в ранние сроки твердения. Предварительное водонасыщение пористых заполнителей, способствует сохранности подвижности бетонной смеси в течение 60 минут, а также полностью предотвращает развитие аутогенной усадки как результат внутреннего ухода.

По данным РФА проб цементного камня, отобранных после механических испытаний бетона (составы №№ 1-4) отмечены изменения в интенсивности дифракционных отражений минерала алита (таблица 4.2, рисунок 4.7).

Для проб цементного камня, соответствующих бетону с сухим пористым заполнителем (состав № 3) в сравнении с бетоном, где использовался предварительно водонасыщенный (состав № 2) и сухой, с дополнительной водой затворе-

ния для внутреннего ухода (состав № 4), можно отметить более характерное повышение интенсивностей основных линий алита:  $d=0,280; 0,277; 0,232; 0,183; 0,154$  нм (рисунок 4.7, 4,8, таблица 4.2).

Одновременно для бетона состава № 3 наблюдается повышение интенсивности дифракционных отражений, характерных для образующегося в процессе гидратации портландцемента минерала портландита:  $d=0,263; 0,193; 0,169$  нм. В тоже время для бетонов, где пористый заполнитель используется как агент внутреннего ухода (составы № 2 и № 4) наблюдается повышение интенсивности дифракционных отражений гидросиликатов кальция:  $C_3SH_2$ ,  $C_2SH_2$  и  $CSH(B)$ , что свидетельствует о более высокой степени гидратации цементного камня и более высокой интенсивности связывания оксида кальция  $CaO$  с микрокремнеземом, который содержит в своем составе химически активный оксид кремния  $SiO_2$ .

Также, для бетона состава № 3 отмечена меньшая интенсивность некоторых линий, идентифицирующих минерал эттрингит:  $d=0,441; 0,344$  нм. Таким образом, вышеприведенное описание рентгенограмм объясняет причину замедленного роста прочности бетона состава № 3 в ранние сроки твердения (рисунок 4.6).

Степень гидратации цемента рассчитана путем определения химически связанной воды по формуле 2.2 в возрасте 7 и 14 суток твердения при температуре  $+30^{\circ}C$  в замкнутых условиях, т.е. без обмена влагой с окружающей средой.

Степень гидратации цементного камня контрольного состава № 1 – цементно-песчаного раствора, в возрасте 14 суток составляет 36,03% (рисунок 4.9). Предварительное водонасыщение пористого заполнителя (состав № 2) приводит к повышению степени гидратации цементного камня в 14 суточном возрасте до 43,65%. При использовании сухого пористого заполнителя с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3) степень гидратации цементного камня на 7 сутки составляет 34,12%, к 14 суткам твердения составляет 35%.

При введении дополнительной воды затворения, необходимой для внутреннего ухода (состав № 4), степень гидратации цементного камня в возрасте 7 суток составляет 38,21%, что выше на 2,25%, чем степень гидратации цементного камня состава № 2 в аналогичный период, где использовался предварительно водона-



сыщенный керамзит. Эти данные объясняют более высокие значения показателя предела прочности при сжатии бетона с дополнительной водой затворения в раннем возрасте (рисунок 4.6).

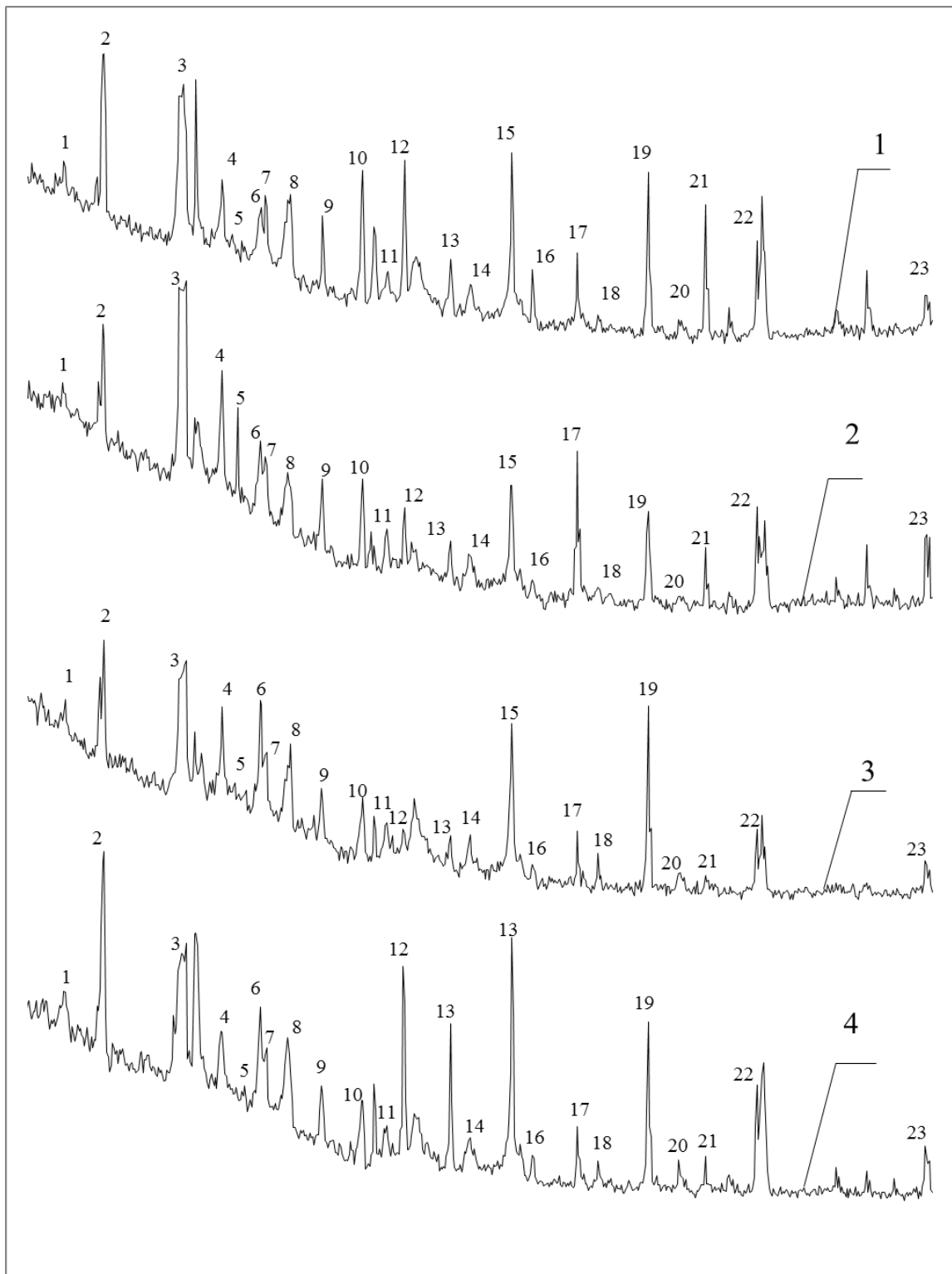


Рисунок 4.7 – Рентгенограммы образцов цементного камня в возрасте 14 суток твердения (обозначение см. табл. 4.2)

Таблица 4.2 – Характеристика рентгенограмм проб цементного камня

№ ре- плики	2Θ, град.	d, нм	Интенсивность реплик для образцов бетона			
			Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
54CaO•16SiO <sub>2</sub> •Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •MgO						
5	30,11	0,297	12,5	49,8	33,9	14,8
6	31,77	0,280	66,5	64,4	156	74,9
7	32,13	0,277	71,8	56,8	90,2	46,1
9	36,21	0,245	49,1	44,2	77,7	41,7
10	39,07	0,232	113,3	61,5	83,3	39,8
11	40,86	0,218	28,9	32,3	38,9	11,8
15	49,81	0,183	147,4	98,6	182,6	136,12
16	51,31	0,176	48,8	15,7	21,6	17,6
18	56,01	0,162	16,8	16,3	24,2	11,8
19	59,6	0,154	123,5	82,6	160,6	82,3
20	61,82	0,149	14,4	12,5	25,6	13,3
Ca(OH) <sub>2</sub>						
8	33,87	0,263	84,8	50,2	106,6	70
14	46,84	0,193	35,1	31,3	53,1	24,6
17	54,11	0,169	61,2	93,7	44,2	29,5
21	64,01	0,145	95	38,1	16,8	12,6
CSH (B)						
4	29,01	0,307	77,2	102,4	54,8	107,7
12	42,98	0,210	58,7	23,6	39,6	99,7
23	79,55	0,122	25	51,6	36,9	26,4
C <sub>2</sub> SH <sub>2</sub>						
13	45,42	0,200	47,5	33,6	48,7	65,2
22	66,98	0,140	72,1	71,8	71	60,7
C <sub>3</sub> SH <sub>2</sub>						
1	17,65	0,502	35,6	42,7	21,1	31
3CaO•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •3CaSO <sub>4</sub> •(31...32) H <sub>2</sub> O						
2	20,06	0,441	120,5	99,6	73,6	139,3
3	26,5	0,334	112,2	126	57,1	73,6

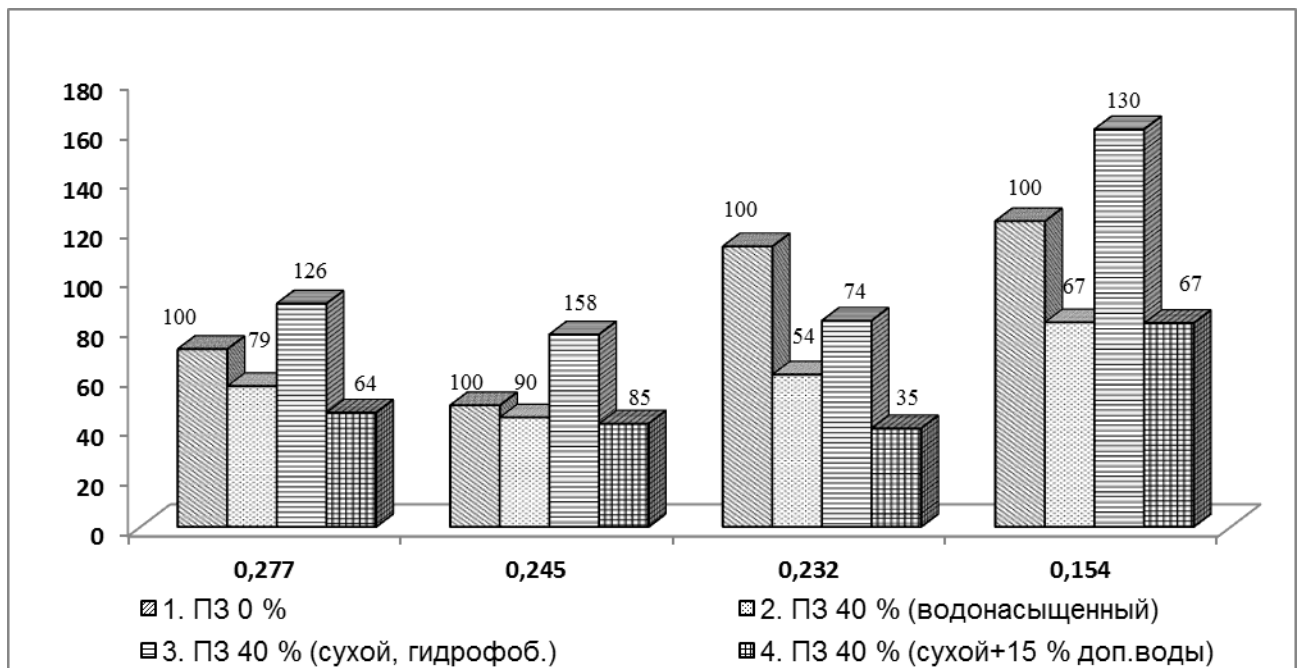


Рисунок 4.8 - Относительная интенсивность (%) основных линий алита

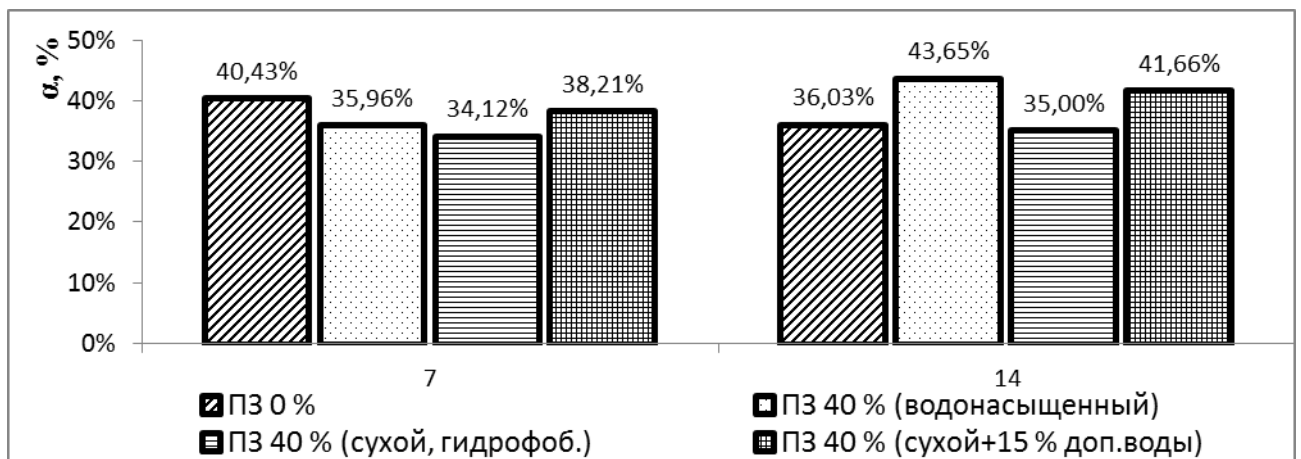


Рисунок 4.9 – Степень гидратации цементного камня при твердении 7 и 14 суток при температуре +30°C

Однако в возрасте 14 суток твердения степень гидратации цементного камня состава № 4 составляет 41,66%, что на 2% меньше показателя для бетона состава № 2 (рисунок 4.9).

#### 4.2. Влияние дополнительной воды затворения на показатели полной усадки высокопрочных легких бетонов

Для определения влияния дополнительного количества воды затворения на показатель подвижности бетонных смесей, аутогенную и влажностную усадки и

прочностные показатели легких бетонов были изготовлены составы легких конструкционных бетонов с частичной (25%) заменой крупного плотного заполнителя (щебня гранитного) – пористым (щебнем керамзитовым), и частичной (50%) заменой мелкого плотного заполнителя (кварцевого песка) – керамзитовым песком. При этом во всех случаях использовались сухие пористые заполнители, без дополнительной воды затворения (состав № 1) и с дополнительной водой затворения, необходимой для внутреннего ухода, количество которой рассчитывалось по формуле 4.1 (состав № 2). Объем дополнительной воды для состава № 2 составляет 0,025 м<sup>3</sup>.

В качестве компонентов бетонных смесей приняты: портландцемент (ПЦ): ПЦ I-500; минеральная добавка: микрокремнезем (МК): MAPEPLAST SF, химическая добавка: суперпластификатор (СП) – Melflux 5581 F; крупный заполнитель плотный – щебень (Щ) гранитный фракции 5-10 мм, мелкий – песок (П) кварцевый; крупный заполнитель пористый (ЩК) – дробленый керамзитовый гравий, фракция 5-10 мм; мелкий – песок керамзитовый (ПК).

Бетонные смеси приготовлены с применением в качестве активной минеральной добавки микрокремнезема в количестве 10% от расхода цемента. Количество суперпластификатора принято постоянным – 0,7% от расхода цемента. Составы и свойства свежеприготовленных бетонных смесей приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Состав и свойства свежеприготовленных бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг (л)/м <sup>3</sup>										Свойства бетонной смеси	
	В/Щ	ПЩ	МК	П	ПК	ЩК	Щ	В	В'	СП	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Д <sub>расп</sub> , мм
1	0,37	612	61	394	163	59	515	224	0	4,3	1924	500
2	0,41	612	61	394	163	59	515	224	24,5*	4,3	1928	530

\*Прим. – избыточное кол-во воды сверх расчетной

Аутогенную усадку бетона исследовали на образцах-призмах размером  $40 \times 40 \times 160$  мм при твердении в условиях, исключающих испарение влаги из бетона (рисунок 4.10). Измерение деформаций образцов выполнено головками измерительными рычажно-зубчатыми типа ИИГ (ГОСТ 18833) с ценой деления 0,001 мм.

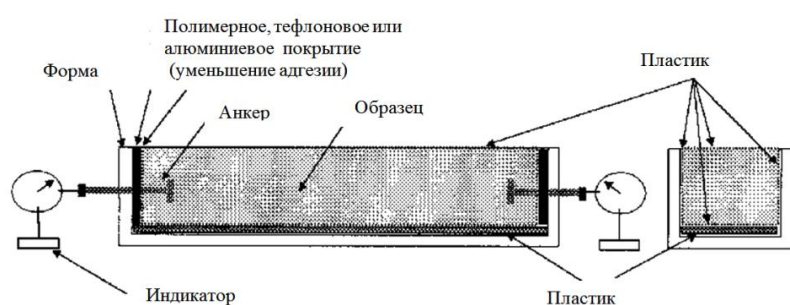


Рисунок 4.10 - Форма для определения линейной деформаций аутогенной усадки образцов с размерами поперечного сечения  $40 \times 40$  мм

Измерение деформаций аутогенной усадки осуществляли в течение 28 суток, затем образцы расформовывали, на их торцы наклеивали стальные реперы и в дальнейшем производили измерения деформаций усадки бетона, вызванных испарением из них влаги (влажностная усадка). При этом образцы хранились в эксикаторе над порошком хлористого кальция.

Измерение линейных деформаций усадки при высыхании бетона проводились с помощью индикаторов часового типа с точностью до 0,01 мм. Схема устройства для определения деформаций усадки при высушивании, образцов бетона представлена на рисунке 4.11.

Текущность ( $D_{распл}$ ) смесей определяли при помощи уменьшенного конуса Абрамса ( $d_1=140$  мм,  $d_2=65$  мм,  $h=215$  мм  $V=2,2$  л.). Предел прочности при сжатии бетона определяли на образцах-кубах со стороной ребра 0,07 м.

Бетонная смесь с сухим пористым заполнителем (состав № 1) характеризуется высокой начальной текучностью (диаметр расплыва конуса 500 мм), однако

вследствие поглощения пористым заполнителем части воды затворения наблюдается ее резкая потеря. В то же время, при введении дополнительной воды затворения для внутреннего ухода (состав № 2) бетонная смесь также характеризуется высокой начальной текучестью (диаметр расплыва конуса 530 мм), однако при этом ее дальнейшая потеря во времени выражена в значительно меньшей мере.

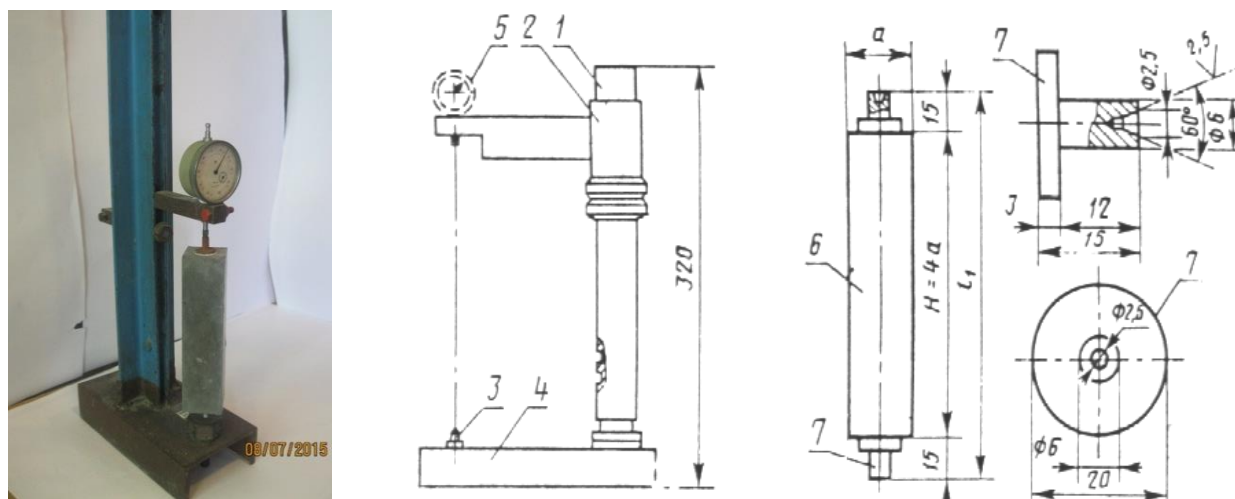


Рисунок 4.11 – Схема устройства для определения деформаций усадки при высыхании образцов бетона с размерами поперечного сечения 40×40 мм:

1 - стойка; 2 - кронштейн; 3 - конусообразный выступ; 4 - нижняя опора; 5 - индикатор; 6 - образец; 7 - репер; а - размер стороны поперечного сечения образца; Н - высота образца;  $l_1$  - база измерений

Введение дополнительного количества воды затворения, увеличивает фактическое значение водоцементного отношения до 0,41, однако, не снижает показатель предела прочности при сжатии бетонов (рисунок 4.12). При этом значение аутогенной усадки бетона состава № 2 в возрасте 28 суток составляет  $-100 \times 10^{-6}$  (рисунок 4.13), что на 50% меньше усадки бетона с сухим пористым заполнителем (состав № 1):  $-200 \times 10^{-6}$ . Очевидно, что поглощаемая пористым заполнителем избыточная часть воды затворения, впоследствии служит агентом внутреннего

ухода, что снижает риск микротрещинообразования бетонов в раннем возрасте вследствие развития аутогенной усадки.

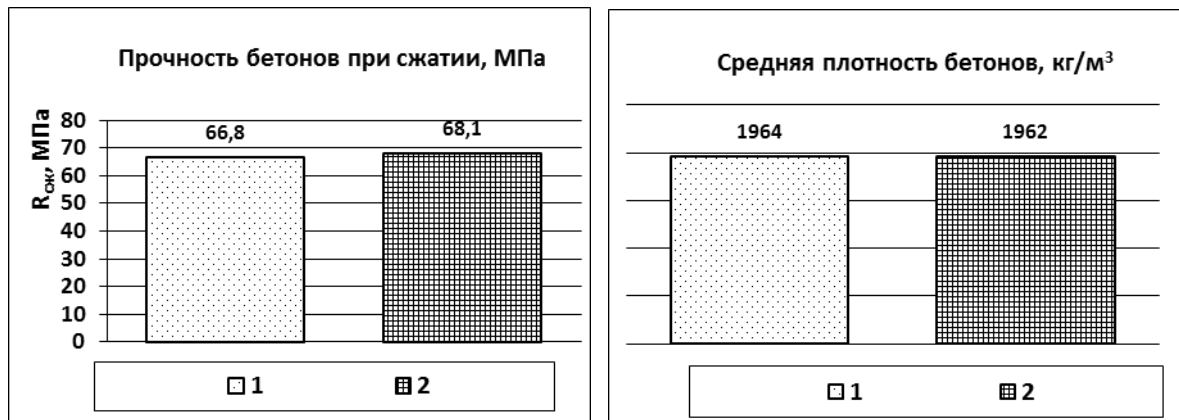


Рисунок 4.12 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) конструкционных легких бетонов

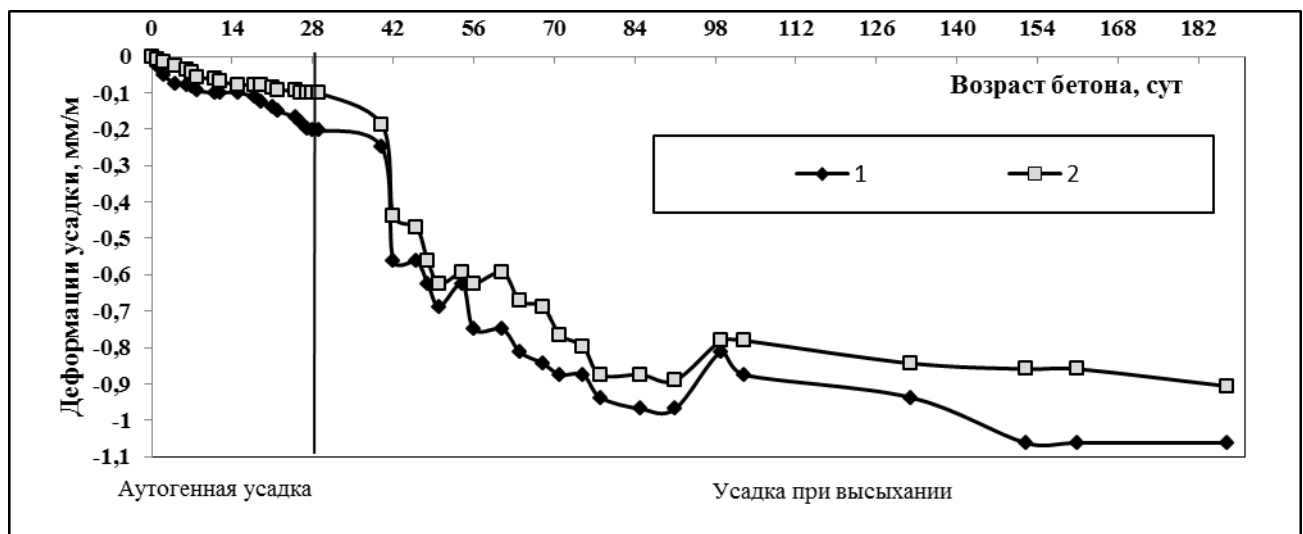


Рисунок 4.13 – Изменение аутогенной усадки и усадки при высыхании бетонов во времени

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 и при этом рассчитана область ухода за бетоном на расстояние до 2 мм от поверхности пористых заполнителей

всех фракций. Показано, что дополнительная 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 4.14).

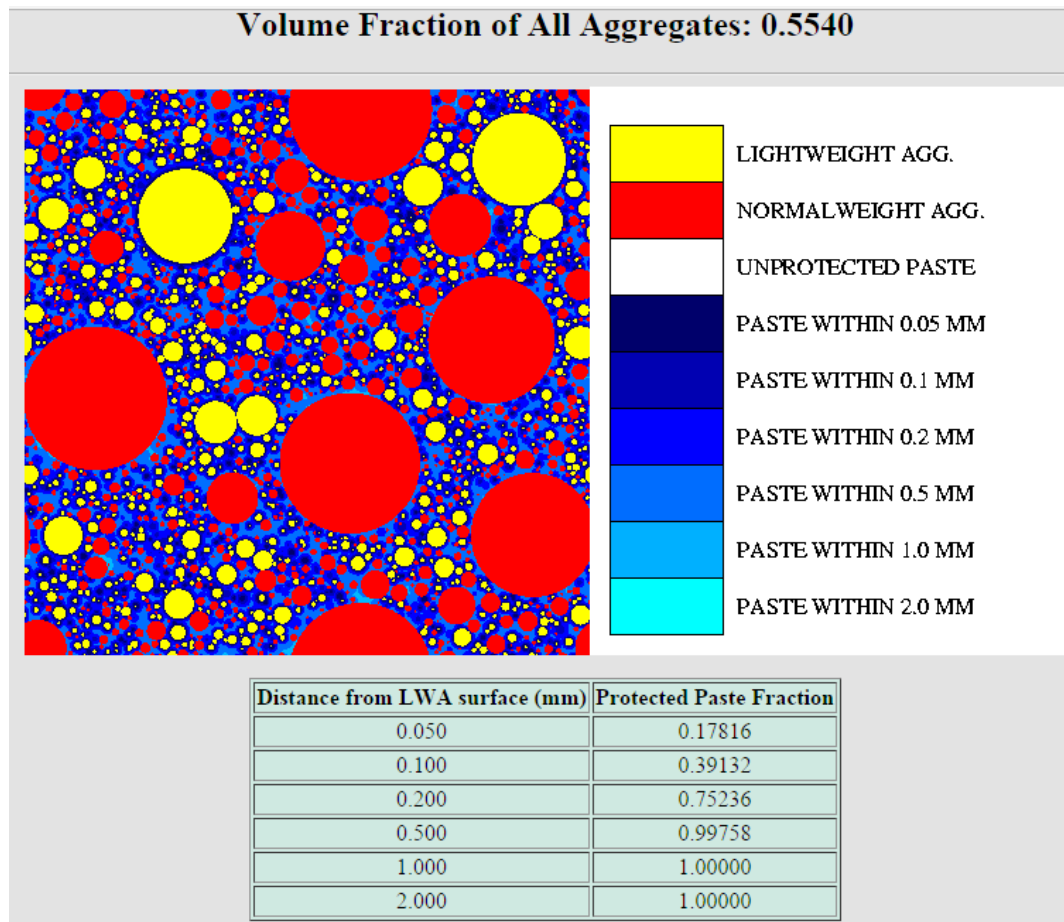


Рисунок 4.14 – 2D модель распределения пористых и плотных заполнителей в бетоне

После измерения аутогенной усадки в течение 28 суток, образцы-призмы помещали в эксикаторе над хлористым кальцием и продолжали измерять усадку бетонов при высыхании. Общая усадка бетона состава № 1 с сухим пористым заполнителем в возрасте 187 суток составляет 1,07 мм/м (рисунок 4.13), в то же



время значение полной усадки бетона с дополнительным количеством воды затворения (состав № 2) составляет 0,9 мм/м, что на 16% меньше.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что избыточная вода затворения, поглощаемая пористым заполнителем, служит для внутреннего ухода за бетоном и снижает значение аутогенной усадки и усадки при высыхании.

#### **4.3. Механические и деформационные свойства легких бетонов в условиях кратковременного нагружения**

Механические и деформационные свойства бетонов в условиях кратковременного нагружения исследовали на образцах трех серий различного состава. Были изготовлены составы легких конструктивных бетонов с частичной (25%) заменой крупного плотного заполнителя (щебня) – пористым (керамзитовым щебнем) и частичной (50%) заменой мелкого плотного заполнителя (кварцевого песка) – керамзитовым песком сухим (состав № 1), керамзитовым песком сухим, с дополнительным объемом воды затворения, требуемой для внутреннего ухода (состав № 2) или зольными микросферами (состав № 3). Составы бетонных смесей и их свойства приведены в таблице 4.4.

Бетонные смеси были приготовлены с применением в качестве активной минеральной добавки микрокремнезема в количестве 10% от расхода цемента и характеризовались одинаковыми значениями водоцементного 0,37 и водовяжущего 0,33 отношения. Количество суперпластификатора принято также постоянным – 0,7% от расхода цемента.

Из бетонных смесей были изготовлены образцы-кубы с размером ребра 100 мм и образцы-призмы размером 100×100×400 мм, которые твердели в нормальных условиях при температуре окружающего воздуха 18-22°C и относительной влажности воздуха не ниже 90%.

Механические и деформационные свойства бетонов исследуемых составов определяли в возрасте 28 и 210 суток. Измерение усадочных деформаций образ-

цов выполнено индикаторами часового типа ИЧ-10 на базе измерения 250 мм (рисунок 4.15).

Таблица 4.4 – Состав и свойства свежеприготовленных бетонных смесей

№	Наименование материала	Расход, кг (л)/м <sup>3</sup>		
		Состав 1	Состав 2	Состав 3
1	Портландцемент: СЕМ I-42,5 N	612		
2	Микрокремнезем: МАРЕPLAST SF	61		
3	Песок кварцевый Просьяновского карьера, М <sub>к</sub> =2,2	394		
4	Зольные микросферы Старобешевской ТЭС	-	-	94
5	Песок керамзитовый, М <sub>к</sub> =3,5	163		-
6	Щебень гранитный фракции 5-10 мм	515		
7	Щебень керамзитовый, фракции 5-10 мм	59		
8	Суперпластификатор: MELFLUX 5581 F	4,3		
9	Вода	224		
10	Вода <sup>!</sup>	-	24,5*	-
Текущность бетонной смеси – диаметр расплыва конуса, мм		500	530	550
Водоцементное отношение		0,37	0,41	0,37
Водовязущее отношение		0,33	0,37	0,33

\*Прим. – избыточное кол-во воды сверх расчетной.

Измерение линейных продольных и поперечных деформаций образцов бетона выполнено индикаторами часового типа ИЧ-10 и МИГ-2 на базе измерения соответственно 250 и 100 мм (рисунок 4.16). В процессе испытаний нагружение

образцов осуществляли ступенями величиной по 0,1 от расчетной предельной нагрузки с 4-минутной выдержкой на каждой ступени.

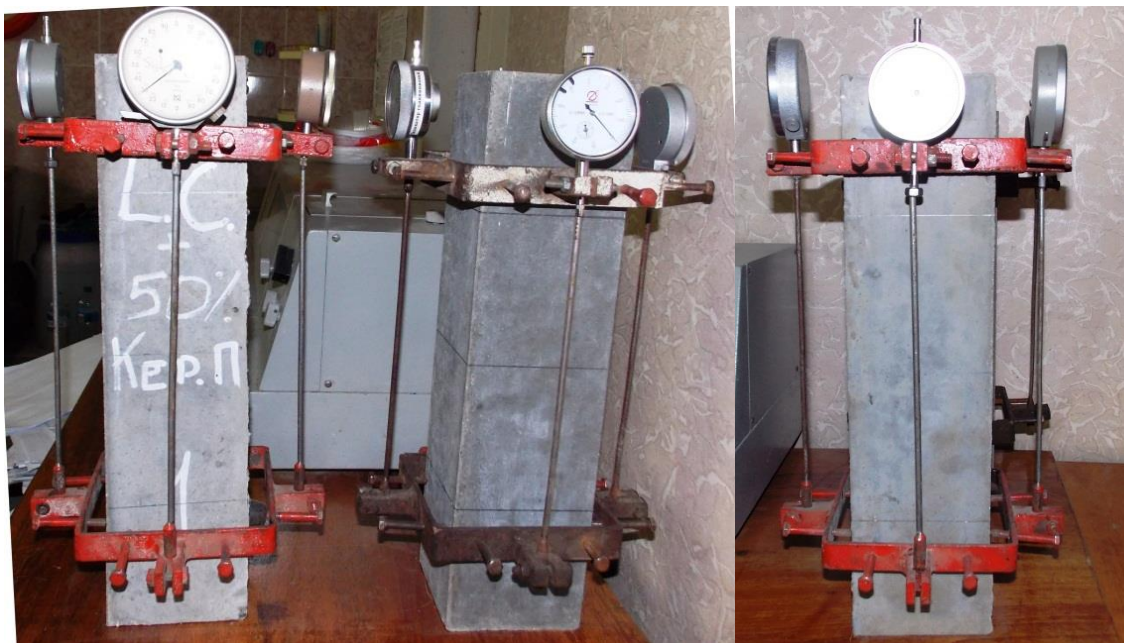


Рисунок 4.15 – Схема устройства для определения деформаций усадки образцов бетона с размерами поперечного сечения 100×100 мм

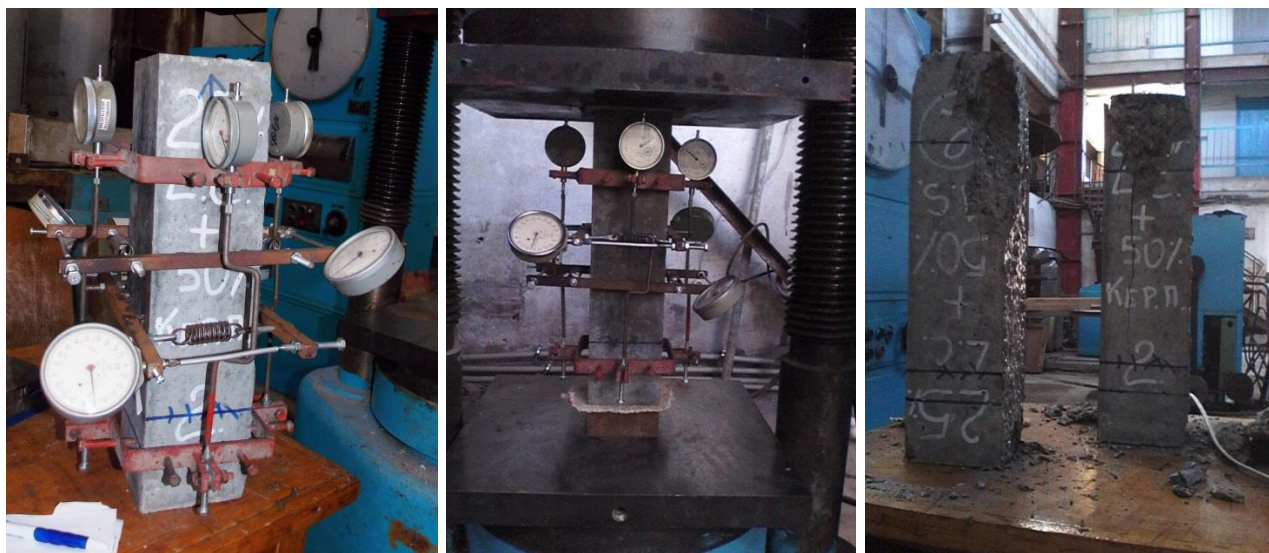


Рисунок 4.16 – Общий вид образца-призмы, оснащенного приборами до и после кратковременных испытаний

По результатам испытаний определяли: призмную прочность бетона  $R_b$ , начальный модуль упругости  $E_b$ , предельные деформации бетона при сжатии  $\bar{\varepsilon}_b$ .

Характеристики деформативных свойств бетона – начальный модуль упругости  $E_b$  определяли по ГОСТ 24452-80 при напряжениях  $\sigma_3 \leq 0,5 \cdot R_b$  в испытаниях на сжатие.

Средние значения кубиковой прочности бетона для трех составов в возрасте  $T=28$  суток 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 при  $t=+20^\circ\text{C}$  в возрасте  $T=210$  сут. 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:  $\bar{\varepsilon}_{b1} = 172 \cdot 10^{-5}$ ;  $\bar{\varepsilon}_{b2} = 188 \cdot 10^{-5}$ ;  $\bar{\varepsilon}_{b3} = 189 \cdot 10^{-5}$ . Результаты кратковременных испытаний на осевое сжатие представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Характеристики механических свойств бетонов при осевом сжатии

Состав	Т, сут	$f_{lck, cube}$ , МПа	$R_b$ , МПа	$E_{lcm} \times 10^3$ , МПа	$\varepsilon_3 \cdot 10^{-3}$
№ 1	28	50,3	-	-	-
	210	-	41,8	33,7	1,72
№ 2	28	59,4	-	-	-
	210	-	49,9	36,8	1,88
№ 3	28	52,3	-	-	-
	210	-	45,4	34,1	1,89

Диаграммы деформирования конструкционных легких бетонов для образцов-призм трех исследуемых серий при кратковременном осевом сжатии в возрасте  $T=210$  сут. при  $\sigma_1=0$  в условиях нормальной температуры представлены на рисунке 4.17. Предельная сжимаемость при кратковременных испытаниях для бетонов серий № 1, № 2 и № 3, соответственно составляет: состав № 1 –  $\bar{\varepsilon}_{b1} = 172 \cdot 10^{-5}$ , состав № 2 –  $\bar{\varepsilon}_{b2} = 188 \cdot 10^{-5}$ ; состав № 3 –  $\bar{\varepsilon}_{b3} = 189 \cdot 10^{-5}$  (рисунок 4.17).

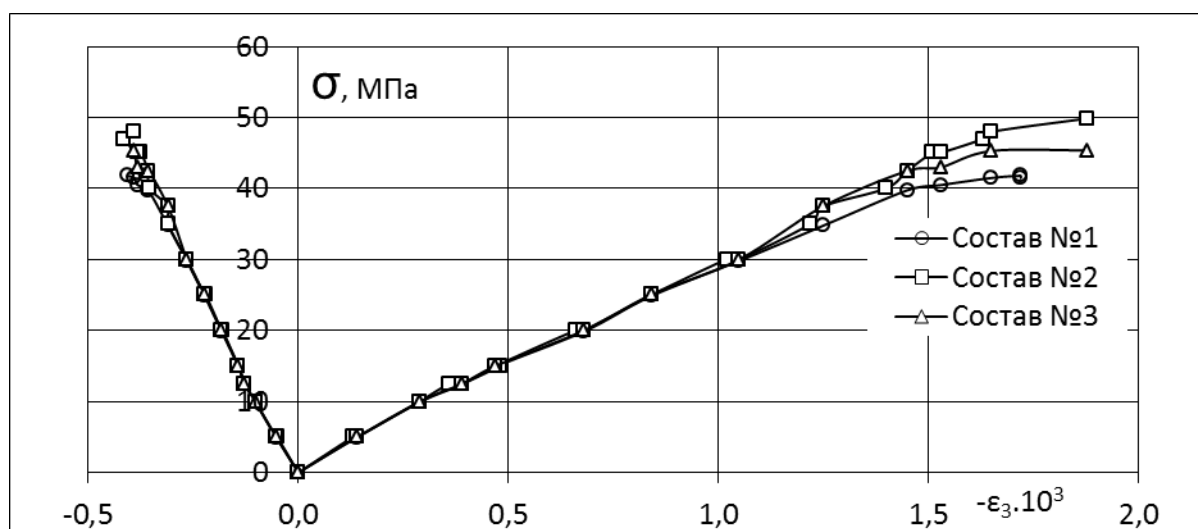


Рисунок 4.17 – Диаграммы деформирования образцов бетона составов 1-3

Деформации усадки при высыхивании для образцов составов № 1, 2 и 3 в возрасте 210 сут. составляют  $\bar{\varepsilon}_{cs1} = 34,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{cs2} = 22,8 \cdot 10^{-5}$  и  $\bar{\varepsilon}_{cs3} = 55,8 \cdot 10^{-5}$  (рисунок 4.18).

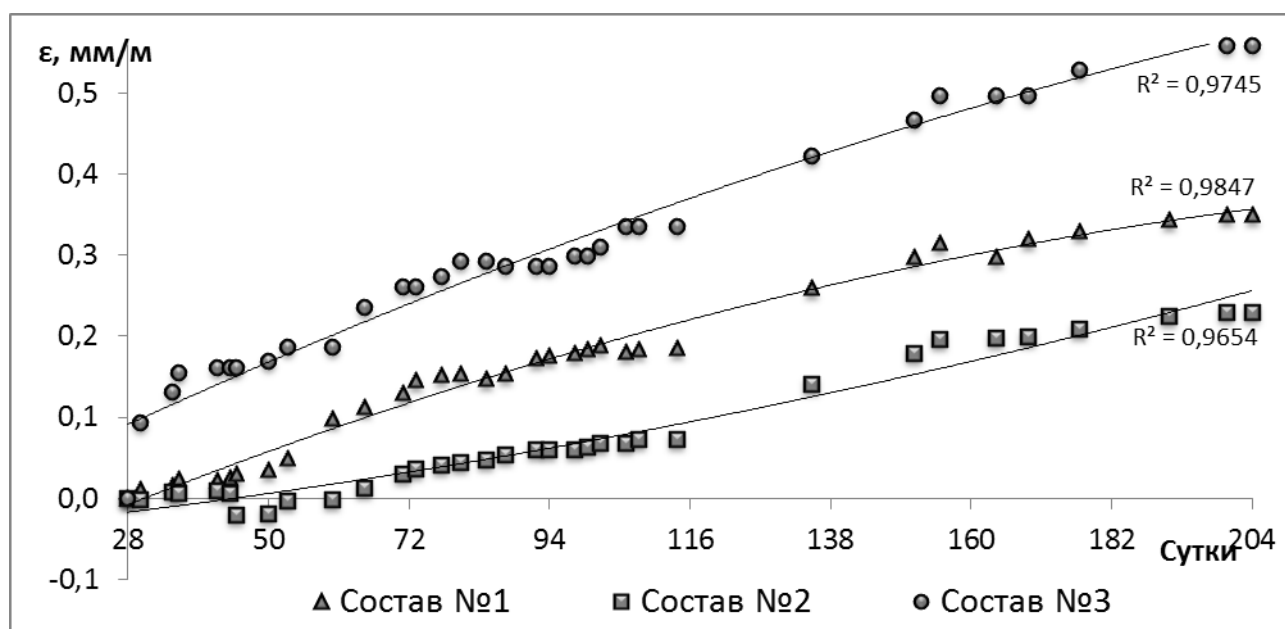


Рисунок 4.18 – Деформации усадки при высыхании для образцов серий № 1, № 2 и № 3

При введении дополнительной воды затворения (состав № 2), необходимой для внутреннего ухода, деформации усадки при высыхании в возрасте 210 суток

твердения на 35% меньше, чем контрольного образца (состав № 1), в котором использовался сухой пористый заполнитель. При введении микросферы, как частичной замены плотного кварцевого песка (состав № 3), усадка бетона при высыхании на 38% выше, чем контрольного состава № 1, и на 59% выше состава бетона № 2 с внутренним уходом.

### Выводы по разделу 4

1. Установлено, что введение дополнительной воды затворения в бетон с сухими пористыми заполнителями не предотвращает потерю подвижности бетонной смеси в течение 60 минут после перемешивания, однако способно минимизировать развитие аутогенной усадки бетона, особенно в ранние сроки твердения. Предварительное водонасыщение пористых заполнителей, способствует сохранности подвижности бетонной смеси в течение 60 минут, а также полностью предотвращает развитие аутогенной усадки как результат внутреннего ухода.

2. 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;

3. 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.

4. 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.

5. 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,  $f_{1ck, cube28}$ , на 18,1%; призмной прочности,  $R_b$ , – на 19,4%; начального модуля упругости,  $E_{1cm1}$ , в возрасте 210 сут. – на 9,2%. Деформации усадки при высыхании,  $\varepsilon_{1cd}$ , 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.

**РАЗДЕЛ 5.****ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ****5.1. Исследование технико-экономической эффективности применения легких высокопрочных бетонов в конструкции железобетонной плиты проезжей части автодорожных мостов**

Действующие нормативные документы ДБН В.2.3-14:2006 «Мосты та труби. Правила проектування», СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы» предусматривают использование в конструкциях автодорожных мостов тяжелого конструкционного бетона с плотностью 2200 – 2500 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 26633. Применение бетонов с другими признаками и плотностью допускается лишь в опытных конструкциях.

В то же время рекомендации зарубежных норм EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: «Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings», EN 1992-2:2007 Eurocode 2. «Design of concrete structures. Part 2. Concrete bridges. Design and detailing rules» устанавливают возможность использования легких бетонов в конструкциях мостов. В свою очередь анализ мирового опыта проектирования и строительства элементов автодорожных мостов из легкого высокопрочного бетона [148-153] свидетельствует о высокой эффективности подобных конструктивных решений особенно для мостов с пролетами более 200 метров, возводимых методом навесного бетонирования. Именно при предельных для железобетона пролетах 200 – 300 м, когда значительную часть от расчетного усилия составляет усилие от постоянной нагрузки (собственного веса), значительное снижение плотности бетона при использовании пористого заполнителя и условии обеспечения высокого класса прочности (LC60 для пролетов от 200 метров) позволяет снизить собственный вес на 25-30%, что снижает расход арматурной стали на пролетных строениях и уменьшает размеры опор и фундаментов.



Согласно исследованиям авторов [2, 148-153] можно выделить следующие достоинства использования легкого конструкционного бетона при строительстве мостов:

- меньшая плотность, что позволяет экономить на армировании пролетного строения, а также уменьшать размеры опор и фундаментов;
- при монтаже элементов моста требуется менее грузоподъемное крановое оборудование (снижение требуемой грузоподъемности крана до 20%) или возможность монтажа элементов больших размеров;
- округлая форма заполнителя улучшает перемешивание смеси, снижает износ смесительного оборудования и опалубки;
- уменьшается расслаиваемость смеси при бетонировании;
- реже наблюдается появление температурных усадочных трещин;
- возможность использования при реконструкции старых мостов в плите проезжей части без замены или усиления существующих главных балок.

Для природных условий Донбасса строящиеся и эксплуатируемые мосты характеризуются средними пролетами до 33 м. В связи с этим актуальной является проблема исследования технико-экономической эффективности применения легких высокопрочных бетонов разработанных составов в конструкциях мостов балочно-разрезной системы с пролетами до 33м в целях перспективного проектирования элементов железобетонных автодорожных мостов по нормам «Eurocode».

Целью исследования технико-экономической эффективности применения легких высокопрочных бетонов в конструкции железобетонной плиты проезжей части автодорожных мостов являлось проведение аналитических исследований влияния средней плотности бетона на коэффициент армирования железобетонных несущих конструкций пролетного строения автодорожных мостов.

Задачи данной работы заключались в следующем:

- проанализировать опыт использования высокопрочных легких бетонов в элементах конструкций автодорожных мостов;

- исследовать влияние средней плотности бетона на коэффициент армирования железобетонной плиты проезжей части автодорожного моста;
- исследовать влияние средней плотности бетона на коэффициент армирования главной балки пролетного строения автодорожного моста;
- определить экономический эффект использования высокопрочного легкого бетона в конструкции пролетного строения железобетонного автодорожного моста через р. Кальмиус в г. Донецк.

Для выполнения поставленных задач исследования был составлен алгоритм расчета коэффициента армирования плиты проезжей части и главной балки автодорожного моста по стандартной методике ДБН В.2.3-14:2006 "Мосты и трубы. Правила проектирования".

В качестве расчетной схемы была принята схема автодорожного моста через реку Кальмиус на автомобильной дороге в городе Донецке от улицы Павла Поповича до автомобильной дороги Славянск – Донецк – Мариуполь.

Исходные данные по техническим решениям конструкции моста.

Мост через р. Кальмиус с габаритом Г-2(14,25+1,05+2,25) м.

Согласно продольному профилю, мост в плане находится на участке кривой радиусом  $R=250$  м, в продольном профиле на участке с уклоном 20‰, угол пересечения с рекой  $53^\circ$ .

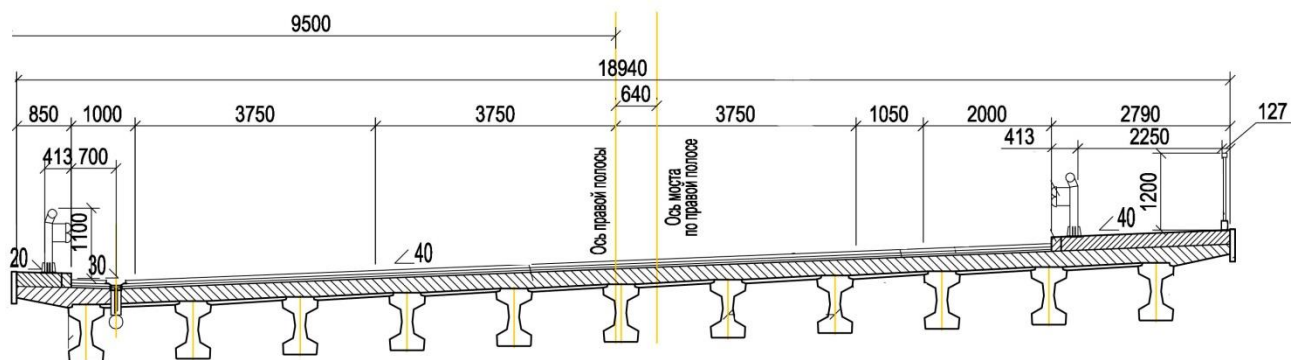


Рисунок 5.1 - Поперечный разрез моста.

*Конструкция крайних опор.*

Крайние опоры – многостоече безростверковые на буронабивных сваях  $\varnothing$  1,2 м с пятой уширения, длиной 20,0; 24,5 и 26,0 м. Надфундаментная часть

опоры из железобетонных столбов диаметром 0,8 м, объединенных между собой монолитной железобетонной диафрагмой.

Ригеля сборные железобетонные прямоугольного сечения 1,4х0,7 м с переменным сечением на консолях, объединены между собой монолитными узлами. Шкафные стенки монолитные железобетонные с доомоноличенной частью для устройства деформационных швов. С внешних сторон шкафные стенки объединяются с открылками. Подфермники монолитные.

*Конструкция промежуточных опор.*

Промежуточные опоры – многостоечные безростверковые, фундаменты из буронабивных свай диаметром 1,2 м с пятой уширения, длиной 18,5; 21,5 и 23,0 м.

Надфундаментная часть опоры из железобетонных столбов диаметром 0,8 м, объединённые между собой монолитной железобетонной диафрагмой.

Ригеля сборные железобетонные прямоугольного сечения 1,6х0,7 м с переменным сечением на консолях, объединенные между собой монолитными узлами. Подфермники монолитные.

*Конструкция пролетных строений.*

Пролетные строения по проекту «ДерждорНДИ» сборные железобетонные типа «З Бет-90» (рис. 5.2) длиной от 18 до 33 м, высотой балки 0,90 м, Т-образного сечения, армированные предварительно напряженными канатами. Балки рассчитаны для сборно-монолитного варианта пролетного строения, который предусматривает устройство монолитной плиты проезжей части. В поперечном сечении: пролет 1-2 – 23 балки, пролеты 2-3, 3-4, 4-5 – 22 балки под шесть полос движения с шагом от 1645 до 1805 мм.

Для уменьшения количества деформационных швов проектом предусмотрено объединение пролетных строений в температурно-неразрезные плиты длиной 36,074 м, с помощью шарнирного сопряжения.

Объединения выполняется монолитной плитой толщиной 230 мм, бетонируемой на месте. Для устройства монолитной плиты используется тяжелый бетон (ДСТУ Б.В.2.7-43-96), класса прочности на сжатие В-35, F200, W8.

Балки пролетных строений устанавливаются на резиновые опорные части РОЧ 20х40х5,2-0,8, РОЧ 30х40х7,8-1,0 по ВСН 86-83.

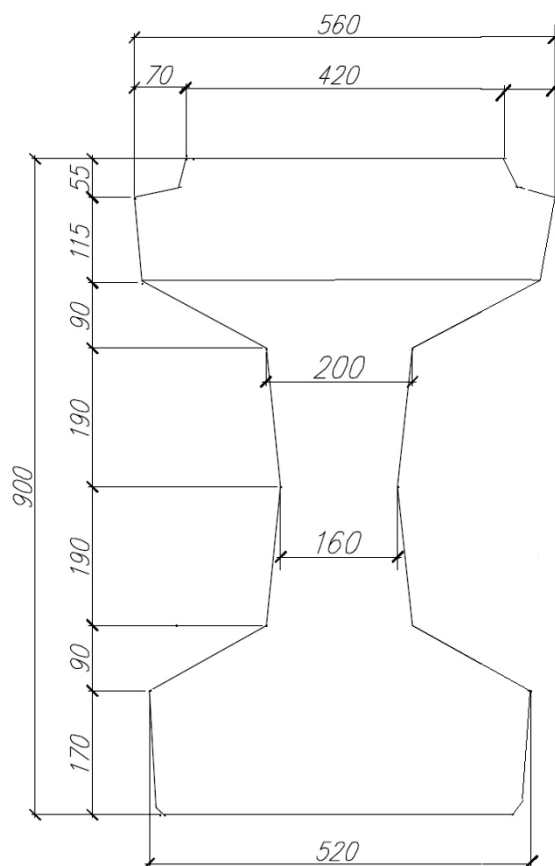


Рисунок 5.2 - Поперечный разрез балки типа «3 Бет-90»

*Конструкция мостового полотна.*

В поперечном сечении мостовое полотно запроектировано с повышенным монолитным тротуаром. Гидроизоляция балок предусмотрена на всю ширину пролетного строения материалом мастикового типа. Защитный слой гидроизоляции по проезжей части мостов устраивается из песчаного асфальтобетона марки Г толщиной 30 мм. Покрытие принято двухслойное из слоев толщиной по 40 мм из мелкозернистого асфальтобетона типа Б, и толщиной 50 мм из ЦМА-20.

Монолитный тротуар и блок разделительной полосы устраиваются отдельно от монолитной плиты. Покрытие на тротуарах эпоксидно-полиуретановое на слое шпаклевки с добавлением кварцевого песка.

Уклон по тротуарам 20 % направлен в сторону проезжей части.

При расчете плиты проезжей части расчетная схема и все необходимые размеры принимались на основании выбранного поперечного сечения моста. Нагрузка на плиту крайней и промежуточной балок неодинакова. В связи с тем, что промежуточная балка имеет более нагруженную плиту, расчет выполняется для плиты этой балки. Однако, предварительные расчеты показали, что из-за малых расчетных пролетов (1,2 – 2,5 м) между балками для опирания монолитной плиты в типовых конструкциях влияние снижения средней плотности бетона на расчетные моменты, а, следовательно, и на коэффициент армирования не существенное (сотые доли процента) и не дает эффекта, который следует ожидать, прежде всего, в коробчатых и плитно-ребристых конструкциях больших пролетов.

Более эффективно использование высокопрочного легкого бетона для пролетных строений в связи с увеличением доли изгибающего момента от постоянной нагрузки в расчетном изгибающем моменте (рисунок 5.3 - 5.7).

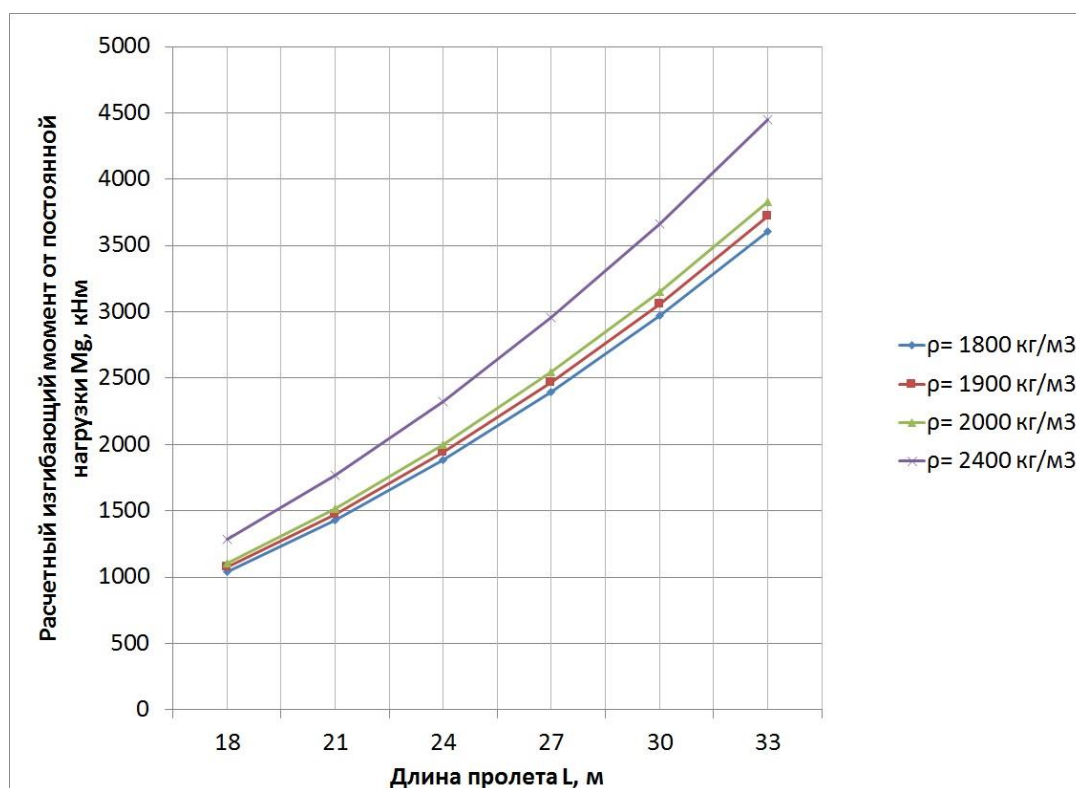


Рисунок 5.3 - Зависимость расчетного изгибающего момента от постоянной нагрузки от длины балки пролетного строения

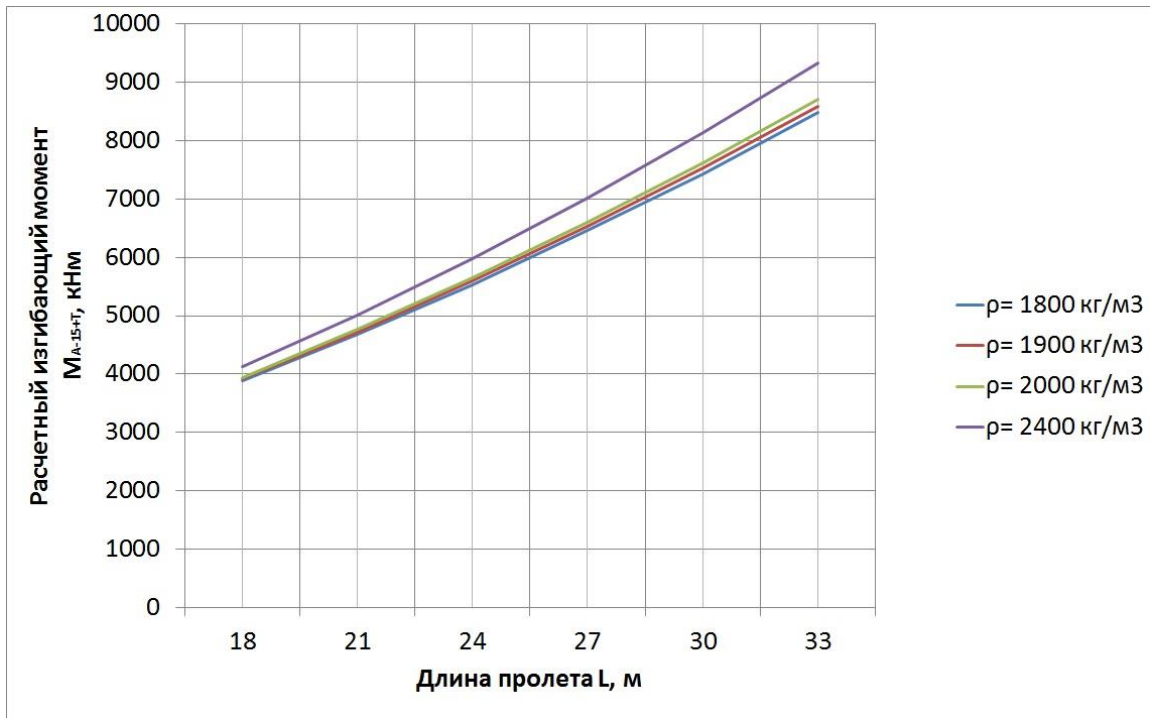


Рисунок 5.4 - Зависимость расчетного изгибающего момента от длины балки пролетного строения

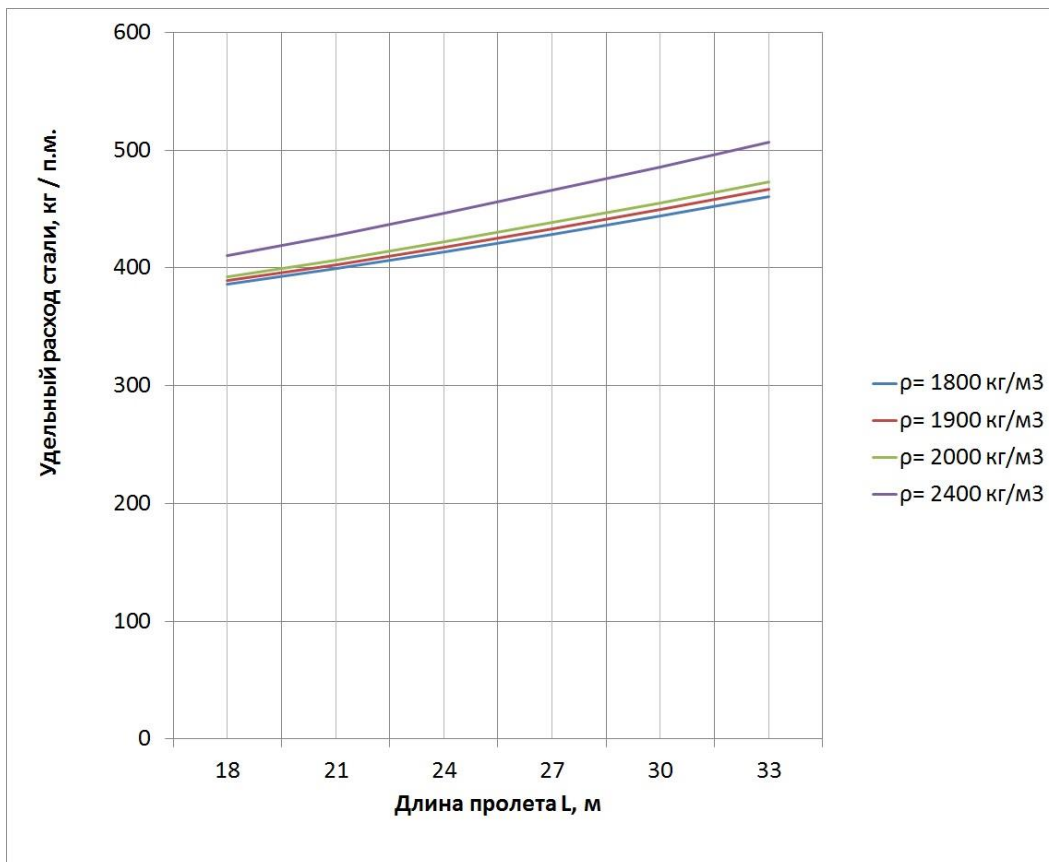


Рисунок 5.5 - Зависимость удельного расхода стали от длины балки пролетного строения

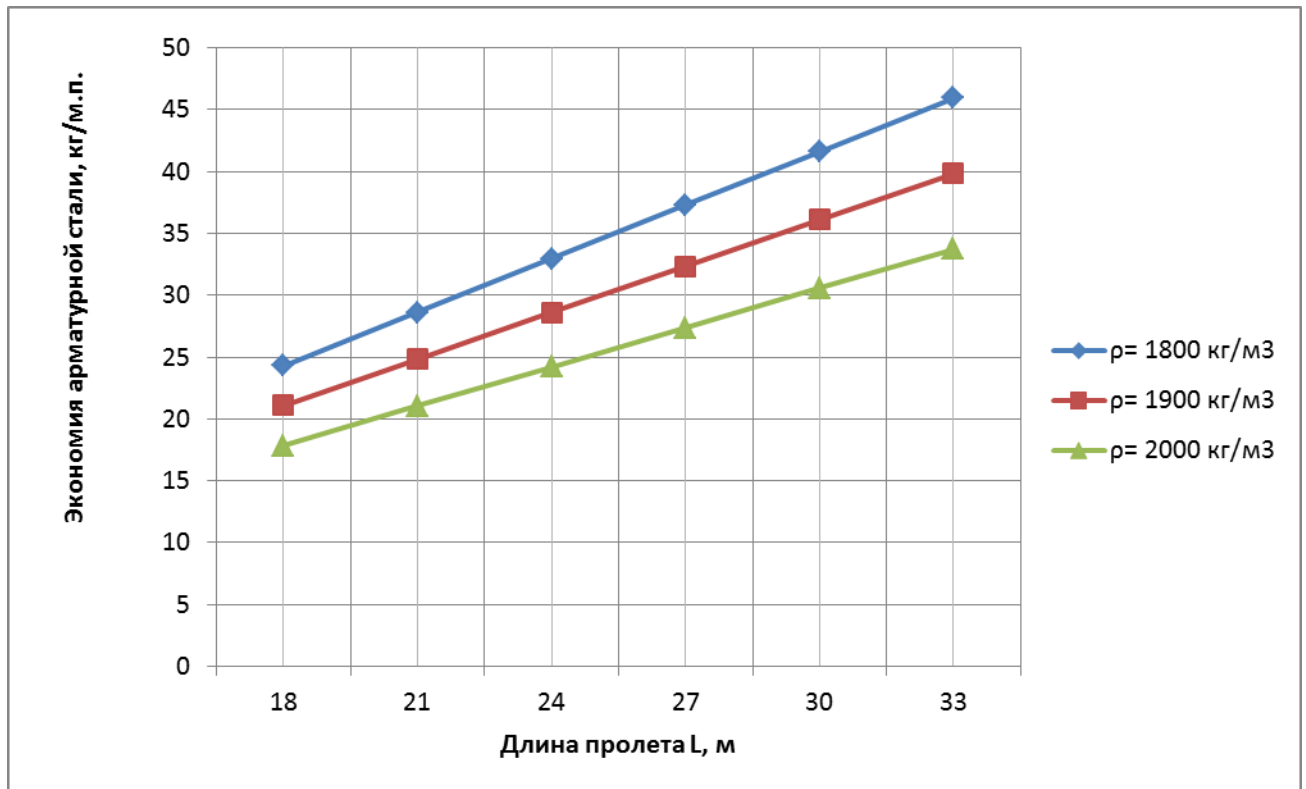


Рисунок 5.6 - Зависимость экономии арматурной стали на п.м. с увеличением длины балки пролетного строения

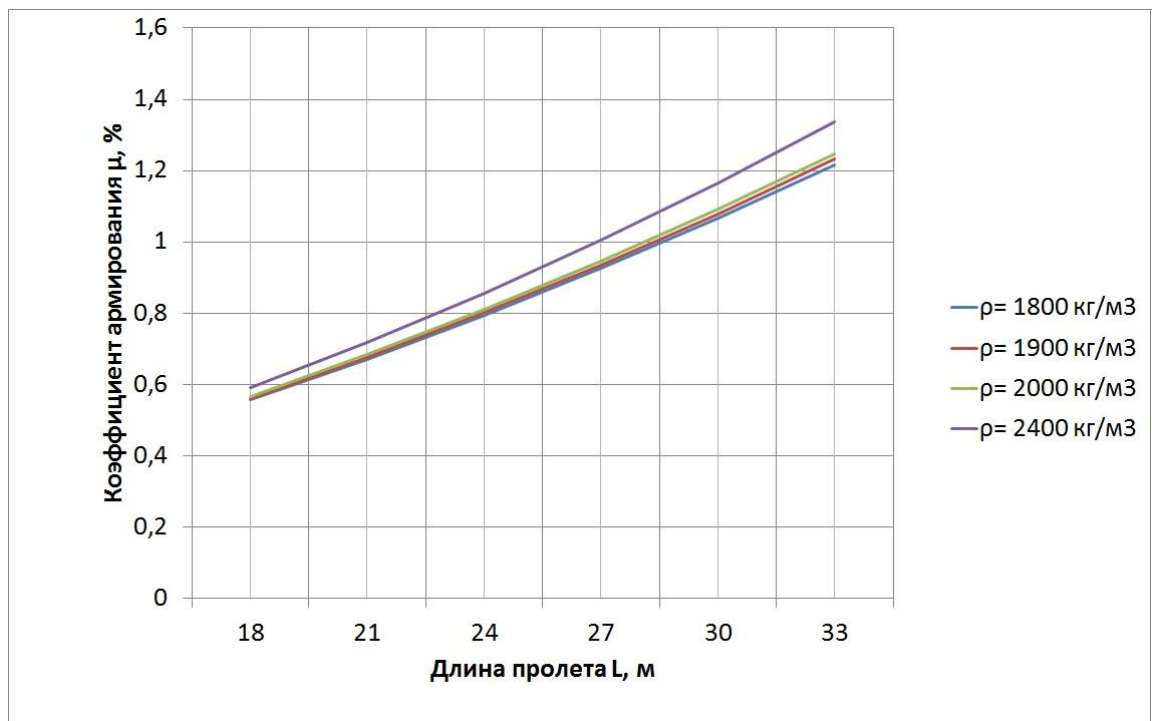


Рисунок 5.7 - Зависимость коэффициента армирования от длины балки пролетного строения

Анализ результатов исследования, представленных на рисунках 5.3-5.7, свидетельствует о том, что при использовании в конструкции пролетных строений длиной от 18 до 33м бетонов со средней плотностью в интервале 1800-2000 кг/м<sup>3</sup>:

- расчетный изгибающий момент от постоянной нагрузки снижается на 14 - 19%;
- суммарный расчетный изгибающий момент от постоянной и временной нагрузки и коэффициент армирования снижаются на 6 – 9%;
- снижение удельного расхода арматурной стали составляет 18 – 46 кг/п.м.

В целом по всему объекту на основании укрупненных расценок был определен экономический эффект использования высокопрочного легкого бетона в конструкциях автодорожного моста (табл. 5.1), который только при учете уменьшении количества рабочей арматуры для различных схем пролетов моста составил от 0,5 до 1 % сметной стоимости строительства объекта.

Закономерным является наблюдаемое увеличение экономического эффекта с увеличением длины используемых пролетов.

Следует отметить, что таблица 5.1 дает лишь приближенную оценку экономического эффекта только по снижению затрат на арматурную сталь. Если учесть, что снижение собственного веса пролетных строений позволит также уменьшить размеры опор и фундаментов, использовать крановое оборудование с меньшей грузоподъемностью, облегчить процесс транспортировки сборных пролетных строений к месту строительства, уменьшить трудозатраты рабочих, то реальный экономический эффект может быть на порядок выше.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- использование высокопрочного легкого бетона в плите проезжей части автодорожных мостов не приводит к снижению коэффициента армирования плиты из-за малых расчетных пролетов между балками в поперечном направлении, однако позволяет значительно уменьшить собственный вес плиты, а, следовательно, и усилия в главных балках;



- использование высокопрочного легкого бетона в главных балках позволяет снизить расчетный изгибающий момент и соответственно коэффициент армирования балки на 6 – 9% в диапазоне пролетов от 18 до 33 м;

- экономический эффект, связанный со снижением расхода арматурной стали, для моста длиной 74 м составил от 0,5 до 1% сметной стоимости и при оценке всех факторов, на которые влияет снижение собственного веса, может быть повышен;

- проблема использования легких высокопрочных бетонов в конструкциях автодорожных мостов нуждается в дальнейших исследованиях с целью определения оптимальных конструктивных решений для условий Донбасса.

Таблица 5.1 – Экономический эффект использования высокопрочного легкого бетона в конструкциях автодорожного моста через р. Кальмиус в г. Донецк

Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Снижение расхода арматурной стали на мост, т	Экономический эффект снижения расхода стали, грн.	Экономический эффект снижения расхода стали, %
<b>Схема 4х18м</b>			
1800	3,499	104966,88	0,58
1900	3,034	91022,88	0,51
2000	2,569	77079,12	0,43
<b>Схема 3х24</b>			
1800	4,745	142361,1	0,79
1900	4,115	123449,76	0,69
2000	3,485	104538,6	0,58
<b>Схема 18х27х27</b>			
1800	4,901	147043,32	0,82
1900	4,250	127509,72	0,71
2000	3,599	107976,3	0,60
<b>Схема 21х33х21</b>			
1800	5,437	163107,36	0,91
1900	4,715	141440,04	0,79
2000	3,992	119772,84	0,66
<b>Сметная стоимость:</b>			
Мост	31920000	грн.	
Пролетное строение	18017000	грн.	
Арматурная сталь	30000	грн.	

## 5.2. Энергоэффективные конструктивные решения в монолитном домостроении при комплексном использовании конструкционных легких бетонов

Энергетическая эффективность здания - это свойство теплоизоляционной оболочки здания и его инженерного оборудования обеспечивать оптимальные микроклиматические условия помещений при фактических или расчетных потерях тепловой энергии на отопление здания. Удельные теплотери на отопление зданий  $q_{зд}$  должны соответствовать условию:

$$q_{зд} \leq E_{\max}, \quad (5.1)$$

где  $E_{\max}$  – максимально допустимое значения удельных теплотери на отопление здания за отопительный период, кВт год/м<sup>2</sup>.

При выполнении данного условия по формуле (5.1) допускается применять отдельные конструктивные элементы теплоизоляционной оболочки с пониженными значениями сопротивления теплопередачи до уровня 75% от минимального значения  $R_{qmin}$  для непрозрачных частей наружных стен и до уровня 80 % от  $R_{qmin}$  для других ограждающих конструкций согласно условию:

$$R_{\Sigma пр} \leq R_{qmin}, \quad (5.2)$$

где  $R_{\Sigma пр}$  – приведенное сопротивление теплопередачи, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Донецкая область находится в первой температурной зоне, для наружных стен значение сопротивления теплопередаче принимается равным  $R_{qmin}=3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  [154].

Тепловые потери жилых здания зависят не только от отношения площади всех наружных поверхностей к объему здания, но и других факторов: общего коэффициента теплопередачи теплоизоляционной оболочки здания (непрозрачная часть здания, окна, наружные двери, фонари, покрытия, цокольные перекрытия, ограждения по грунту); интенсивности солнечной радиации; теплового поступ-

ления от бытовых приборов; характеристик систем инфильтрации и вентиляции; площади остекленных поверхностей и ориентации их по сторонам света.

Для Донецкой области нормативные максимальные тепловые потери, в зависимости от этажности, составляют соответственно 40-55 кВт·час/м<sup>2</sup> для жилых и 12- 15 кВт·час/м<sup>2</sup> для общественных зданий [154].

Класс энергетической эффективности здания определяют по разнице в % расчетного или фактического значения удельных тепловых затрат,  $q_{зд}$ , кВт·час/м<sup>2</sup> или [кВт·час/м<sup>3</sup>] от максимально допустимого значения удельных теплотрат на отопление здания за отопительный период,  $E_{max}$ , кВт·час/м<sup>2</sup> или [кВт·час/м<sup>3</sup>].

Классификация зданий по энергетической эффективности представлена в таблице 5.2 [154].

Таблица 5.2 – Классификация зданий по энергетической эффективности

Класс энергетической эффективности здания	Разница в % расчетного или фактического значения удельных теплотрат, $q_{зд}$ , от максимально допустимого значения, $E_{max}$ , $((q_{зд} - E_{max})/E_{max}) \cdot 100\%$ .
А (пассивный)	-50 и меньше
В (экономный)	от -49 до -10
С (энергосберегающий)	от -9 до 0
Д (стандартный)	от 1 до 25
Е (энергозатратный)	от 26 до 75
Г(самый энергозатратный)	76 и больше

В Европейских странах класс энергетической эффективности зависит от количества энергии, необходимой на обогрев здания, вентиляцию, подогрев воды, работу кондиционеров и освещения. Этому требованию отвечает стандартный дом класса D ( $0,75 < EP \leq 1$ ).

Здания и сооружения относятся к энергосберегающим-пассивным, когда ограждающие конструкции обеспечивают нормативное сопротивление теплопередаче с минимумом тепловодных включений и герметичностью стыковых соединений, а также с минимальным проникновением и накоплением водяных па-

ров в толще и на поверхности конструкций ограждения в процессе возведения и эксплуатации здания. В то же время ограждающие конструкции должны обладать требуемой прочностью, жесткостью, устойчивостью и долговечностью. Ограждающие конструкции (наружные стены), как и здание в целом, должны вписываться в архитектуру рядом стоящих зданий, удовлетворять требованиям как по эксплуатации и ремонту, так и экономической эффективности. Результирующая стоимость 1 м<sup>2</sup> жилья будет зависеть не только от минимума приведенных затрат, но и от теплофизических характеристик строительных материалов. Очевидно, чем меньше коэффициент теплопроводности строительных материалов, из которых возводится конструкция несущей стены, тем меньше толщина несущего слоя [155], и как следствие, уменьшается нагрузка на основание и фундаменты, что ведет к сокращению расхода стали при возведении фундаментов. В большей степени это отражается при проектировании и возведении зданий по монолитно-каркасной технологии.

Монолитные здания практически не имеют монтажных швов, что практически нивелирует, снижает проблемы со стыками и их герметизацией (мостики холода), вследствие чего повышаются теплотехнические показатели здания. Монолитная технология позволяет возводить здания повышенной этажности и различной конфигурации, как по горизонтали, так и по вертикали, формировать объемные ячейки, а также большие пролеты за счет перехода к неразрывным пространственным системам. Планы зданий могут иметь криволинейную и уступчатую конфигурацию.

Целью данной работы является исследование и сравнение показателей энергоэффективности конструкций несущих наружных стен с монолитным слоем из тяжелого и легкого бетона.

Запроектирован состав конструкционного легкого бетона со следующими показателями: средняя плотность,  $\rho_0=1800 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения,  $R_{сж}=55,5 \text{ МПа}$ , модуль упругости,  $E_b=33,3 \text{ ГПа}$ , коэффициент конструктивного качества ( $KKK=30$ ); коэффициент теплопроводности,  $\lambda_p=0,80 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

В качестве расчетной конструктивной схемы приняты два варианта сопряжения наружной стены с перекрытием. В первом варианте принят несущий слой – монолитный железобетон, во втором – монолитный легкий железобетон. Для обоих вариантов в качестве утеплителя приняты плиты негорючие теплоизоляционные базальто-волокнистые; отделочный слой – цементно-песчаная штукатурка. Расчетная конструктивная схема наружной стены представлена на рис. 5.8. Физические свойства строительных материалов, используемых для устройства наружной стены, представлены в таблице 5.3.

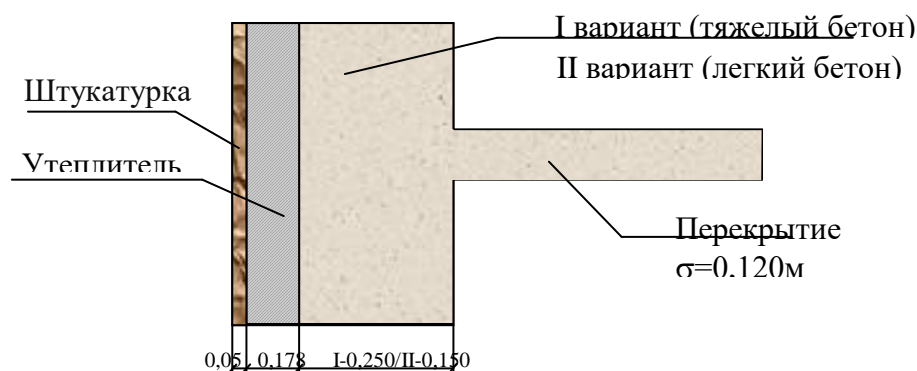


Рисунок 5.8 – Расчетная конструктивная схема наружной стены и перекрытия.

Таблица 5.3 – Физические свойства строительных материалов наружной стены

№ п/п	Наименование строительного материала	Толщина, $\sigma$ , м	Средняя плотность, $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, $\lambda_p$ , Вт/(м·К)
1	Цементно-песчаная штукатурка	0,05	1600	0,81
2	Плиты негорючие теплоизоляционные базальто-волокнистые	0,175	40	0,059
3	Монолит: I вариант – тяжелый железобетон	0,250	2530	2,04
	II вариант - легкий железобетон	0,150	1800	0,80

С помощью программы «Structure CAD® 11.5» выполнен статический расчет для жилого дома типовой серии 87. Расчетная схема представляет собой си-

стему стержневых элементов с двумя наружными и внутренней стенами. Расстояние между стенами 6,0 м. Рассматриваем участок секции шириной 1,0 м. Вертикальные стержни моделируют работу наружных стен и имеют размеры расчетных сечений 1000х250 мм и 1000х150 мм для двух вариантов. Нагрузки в расчете приняты согласно ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования; общий вид расчетной схемы приведен на рисунке 5.9.

В результате статического расчета получены внутренние усилия. Для каждого варианта принято минимально допустимое армирование в соответствии с конструктивными требованиями, предъявляемыми к железобетонным внецентренно нагруженным элементам, согласно [156-157].

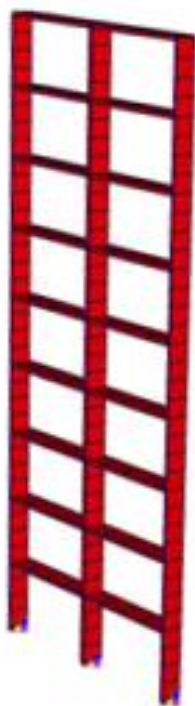


Рисунок 5.9 – Общий вид расчетной схемы.

По внутренним усилиям определены уровни напряжения с учетом принятого армирования. Согласно статическому расчету, конструктивным требованиям и пожаробезопасности зданий [156-158] для варианта 2 принята несущая наружная стена из легкого бетона толщиной 0,150 м. Максимально возможное количество этажей жилого дома не должно превышать девяти. При увеличении процента армирования в бетоне возникают напряжения превышающие прочность материала. Результаты статического расчета жилого дома для двух вариантов приведены в таблице 5.4.

Приведенное сопротивление теплопередачи рассчитывалось для каждого варианта с помощью численного моделирования температурных полей с использованием программы THERM 7.0. Данный метод сечений позволяет учитывать в полной мере влияние всех теплопроводных включений и дополнительных теплотерь через участки конструкции, а также отражает трансмиссионные потери теплоты через наружную стену.

Таблица 5.4 – Результаты статического расчета жилого дома

Вариант №1							Вариант №2				
Эта ж дома	N, кН	M, кН м	ар- ма- тура	коэффи- циент напря- же- нного состоя- ния	про- цент арми- ро- вания	масса арма- ту-ры на 1м <sup>3</sup> бетона	N, кН	M, кН м	арма- тура	коэффи- циент напря- же- нного состоя- ния	про- цент арми- ро- вания
9	29, 6	9,81	5ø8	0,41	0,11	3,94	29, 6	9,81	5ø8	0,57	0,314
	30	10,6					30	10,6			
5	182	8,7		0,41			182	8,7	7ø12	0,97	0,989
	166	0,51					166	0,51			
1	328	8,6		0,51			328	8,6	10ø1 6	0,98	2,512
	276	6,14					276	6,14			

Приведенное сопротивление теплопередачи рассчитывалось для каждого варианта с помощью численного моделирования температурных полей с использованием программы THERM 7.0. Данный метод сечений позволяет учитывать в полной мере влияние всех теплопроводных включений и дополнительных теплотерь через участки конструкции, а также отражает трансмиссионные потери теплоты через наружную стену.

Алгоритм расчета приведенного сопротивления теплопередаче заключается в следующем.

1. Устанавливаются геометрические размеры конструкции (выделяются участки по внутреннему обмеру размером 1 м).

2. Устанавливаются значения теплопроводности каждого конструктивного слоя [154].
3. Назначаются расчетные значения температур (внутренняя  $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$ , наружная  $t_{н} = -22^{\circ}\text{C}$ ) и коэффициентов теплоотдачи поверхностей. На сечениях конструктивных слоев условия считаются адиабатическими.
4. По программе Therm 7.0 определяется значение теплового потока  $U$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).
5. Приведенное сопротивление представляет собой усредненные значения для выбранной плоскости и может быть найдено по формуле:

$$R_{\Sigma np} = \frac{1}{U}. \quad (5.3)$$

Результаты расчетов представлены на рисунке 5.10 и в таблице 5.5.

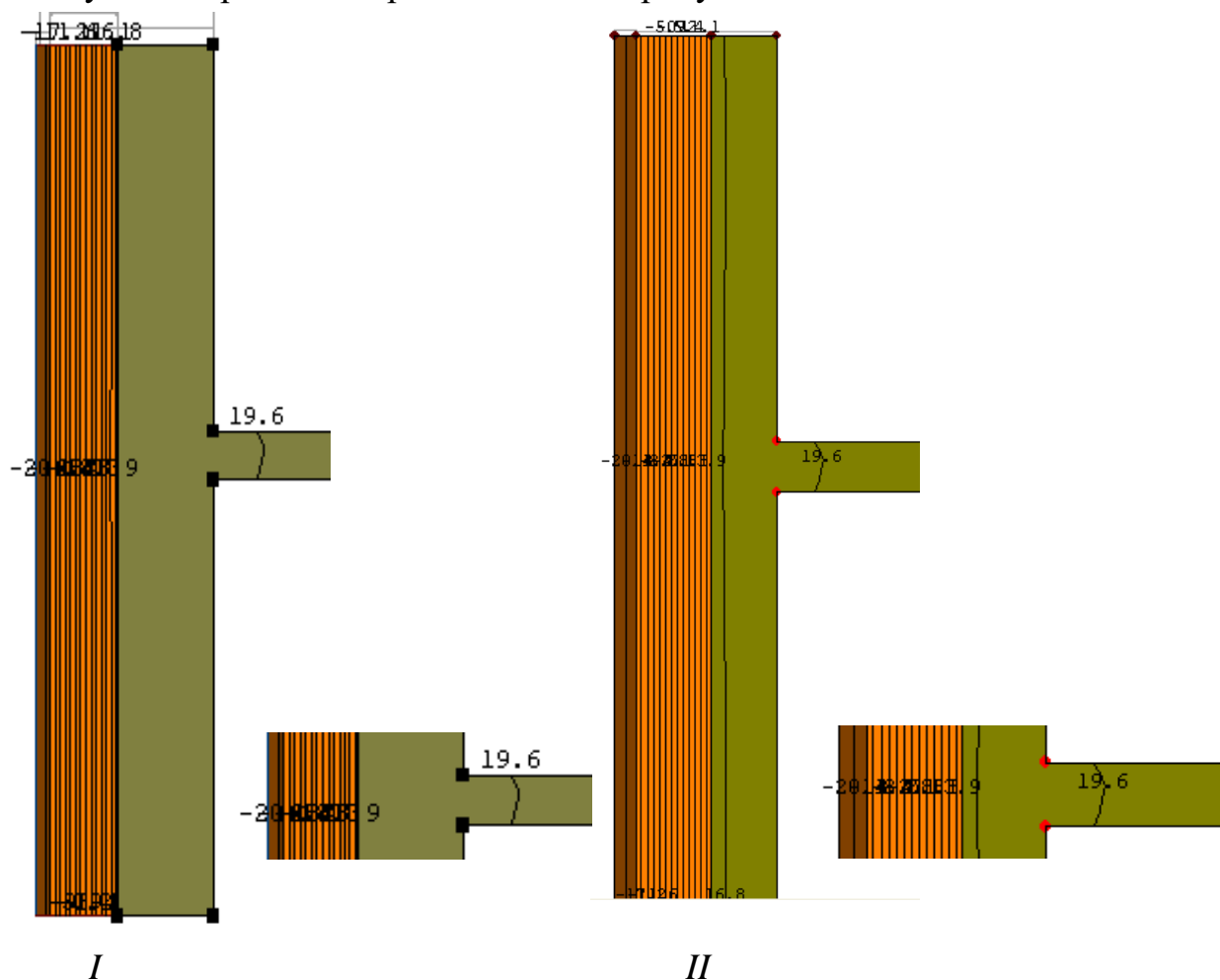


Рисунок 5.10 – Распределение плотности теплового потока по сечению наружной стены и перекрытия: I – наружная стена с несущим слоем из монолитного тяжелого бетона, II– наружная стена с несущим слоем из монолитного легкого бетона.



Таблица 5.5 – Приведенные сопротивления теплопередачи наружной стены жилого дома

Вид конструкции наружной стены	Нормативное сопротивление теплопередачи, $R_{qmin}, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	Тепловой поток $U, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Коэффициент термической однородности, $r$	Сопротивление теплопередачи, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	
				по основному полю, $R_{\Sigma}$	приведенное, $R_{\Sigma пр}$
Монолитный несущий слой из тяжелого бетона	3,3	0,29	1,02	3,39	3,45
Монолитный несущий слой из легкого бетона	3,3	0,29	1,01	3,40	3,45

Приведенные на рисунке 5.10 температурные поля свидетельствуют о преимуществе утепления с внешней стороны, когда линии равных температур расположены параллельно поверхностям стены. Анализ полученных результатов согласно расчету показывает, что значительные стоки теплоты не наблюдаются по неоднородности конструкции, что связано с оптимальным подбором толщины утеплителя для двух вариантов конструкции.

Приведенное термическое сопротивление теплопередаче составляет: для I варианта  $R_{\Sigma пр}=3,45$  при толщине наружной стены 0,475 м, и для II варианта  $R_{\Sigma пр}=3,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при толщине наружной стены 0,375 м. Коэффициент термической однородности для I варианта составляет  $r=1,02$  и для II варианта  $r=1,03$ . Полученные значения соответствуют требованиям [154], в которых рекомендуется принимать коэффициент термической однородности не менее 0,7. При этом характер распределения теплового потока одинаков. Температура поверхности несущего слоя стены в местах сопряжения с монолитной плитой перекрытия, внутри помещения составляет 19,6°С для I и II вариантов. При этом температурный перепад между температурой воздуха внутри помещения и приведенной темпе-

ратурой внутренней поверхности конструкции наружной стены,  $\Delta t_{пр}, ^\circ\text{C}$ , составляет  $2,4^\circ\text{C}$ , что не превышает допустимого значения  $\Delta t_{сг}, ^\circ\text{C} = 4^\circ\text{C}$  [154], а значит обеспечивает энергоэффективность и, соответственно, внутренний климатический комфорт помещений жилого монолитно дома. Кроме того, толщина наружной несущей монолитной стены из легкого бетона снизилась на 21% по сравнению со стеной из тяжелого бетона при обеспечении энергоэффективности здания. Это обуславливает уменьшение себестоимости жилого дома по одному из основных показателей – стоимости возведения каркаса здания, а значит снизит стоимость возведения  $1 \text{ м}^2$  монолитного каркаса здания.

Конструктивные решения наружной стены и перекрытия для двух вариантов жилого монолитного домостроения отвечают современным требованиям строительства по показателям энергоэффективности ( $R_{\Sigma пр}^I = 3,45$  и  $R_{\Sigma пр}^{II} = 3,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  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 (II вариант) позволяет уменьшить конструктивный слой стены на 21 %, что в свою очередь отразится на снижении сроков возведения конструкций за счет снижения материалоемкости (в части бетона) и механоемкости. Это существенно снизит стоимость  $1 \text{ м}^2$  при обеспечении энергоэффективности монолитного девятиэтажного жилого дома из конструкционного легкого бетона.

### Выводы по разделу 5

1. Установлено, что при использовании бетонов со средней плотностью в интервале 1800-2000 кг/м<sup>3</sup> наблюдается эффект снижения расхода арматурной стали в пролетных строениях. В главных балках позволяет снизить расчетный изгибающий момент и соответственно коэффициент армирования балки на 6 – 9% в диапазоне пролетов от 18 до 33 м.

2. Экономический эффект, связанный со снижением расхода арматурной стали, для моста длиной 74 м составил от 0,5 до 1% сметной стоимости и при оценке всех факторов, на которые влияет снижение собственного веса, может быть повышен.

3. Конструктивные решения наружной стены и перекрытия для двух вариантов жилого монолитного домостроения отвечают современным требованиям строительства по показателям энергоэффективности ( $R^I_{\Sigma np}=3,45$  и  $R^{II}_{\Sigma np}=3,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  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 (II вариант) позволяет уменьшить конструктивный слой стены на 21 %, что в свою очередь отразится на снижении сроков возведения конструкций за счет снижения материалоемкости (в части бетона) и механоемкости. Это существенно снизит стоимость 1 м<sup>2</sup> при обеспечении энергоэффективности монолитного девятиэтажного жилого дома из конструкционного легкого бетона.

## ВЫВОДЫ

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

2. Установлено, что предварительное замачивание крупного пористого заполнителя до полного водонасыщения приводит к росту начальной подвижности легкого бетонной смеси, в дальнейшем обеспечивая практически неизменную подвижность в течение 90 минут выдерживания ( $\Delta\P \leq 15\%$ ), однако при этом наблюдается снижение 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/м<sup>3</sup>, коэффициентом конструктивного качества ККК=31 / 28.

4. Установлено, что величина водопоглощения керамзита (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 легкого бетонной 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  $\epsilon_{ca} = -100 \times 10^{-6}$ , 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,  $f_{lck, cube28}$ , 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,  $\epsilon_{lcd}$ , 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исаев, В.Ф. Керамзитобетон в мостостроении / В.Ф. Исаев // Тезисы докладов 111 Всесоюзной конференции по легким бетонам. – М.: Стройиздат. – 1985. – С. 146-147.
2. Building Bridges and other Marine Structures with Structural Lightweight Aggregate Concrete. – ESCSI Information Sheet № 4700.4. – 26 p.
3. Caroland W.B. Spliced Segmental Prestressed Concrete I-Beams for Shelby Creek Bridge / W.B. Caroland, D. Deep, H. H. Janssen, L. Spaans // PCI Journal. – 1992. – P. 22-33
4. Celik, H.O. Lightweight HPC on route 106 bridge in Virginia / H.O. Celik // Virginia Transportation Research Council, 2004. - №32
5. Clarke, J.L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / J.L. Clarke // Published by Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Wester Cleddens Road, Bishopbriggs, Glasgow G64 2NZ. – Taylor & Francis e-Library. – 2005. – 148 P.
6. Dennis W.S. Thomas A. H. Bridge Rehabilitation with structural lightweight concrete / W.S. Dennis // Materials for the new millennium, - №4700.6. – 2002.– 8 pp.
7. Fergestad S. Bridges Built with Lightweight Concrete in Norway / S. Fergestad // International Symposium on Lightweight Concrete Bridges, Caltrans, Pacific Custom Materials – Sacramento, California. – 1996.
8. Helland S. Lightweight Aggregate Concrete in Norwegian Bridges/ S. Helland, A.S. Selmer // HPC Bridges views. – Issue No. 11. – September/October 2000. – pp 2-3.
9. Hoff, G.C. The Use of Structural Lightweight Aggregates in Off Shore Concrete Platforms / G.C. Hoff, R. Wawm, J.K. Weng, R.E. Nunez // International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete; Edited by Holand I., Hammer T. A., and Fluge, F. – Sandefjord, Norway – 1995.

10. Holland R.B. High Strength Lightweight Concrete Properties of the I-85 Ramp over State Route 34 / R.B. Holland, F.L. Kahn // HPC Bridge Views. - Issue 61, May/June 2010. – P. 1-10.
11. Liles P. High Strength Lightweight Concrete for Use in Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders in Georgia / P. Liles, R.B. Holland // HPC Bridge Views. - Issue 61, May/June 2010. – P. 1-10.
12. Roberts, J.E. Lightweight Concrete for California's Highway Bridges / J.E. Roberts // Portland Cement Association. – 1997. – Vol.10, No.3
13. Turner, C. American Concrete Tankers / C. Turner // Sea Breezes. – Vol. 70. – No. 612. – 1996. – pp. 939-945.
14. Vaysburd, A.M. Durability of Lightweight Concrete Bridges in Severe Environments / A.M. Vaysburd // Concrete International. – №18. – 1996. – p. 33-38.
15. Weiss, W.J. Improving Concrete Bridge Decks with Internal Curing, Concrete / Di C. Bella, D.P. Bentz // Bridge Views. – Iss.69. – 2013.
16. Фаликман, В.Р. Высокопрочный легкий бетон: технология и свойства / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, О.М. Горячев // Бетон и железобетон. – № 2. – 2005 – С. 8-11.
17. Бужевич, Г.А., Долговечность легких бетонов на пористых заполнителях / Г.А. Бужевич, Г.И. Горчаков // Всесоюзная конференция по легким бетонам: тезисы докладов. – М.: Гостройиздат, 1970. – С. 61-73.
18. Вальц, К. Конструктивный высокопрочный легкий бетон: Пер. с нем./ К. Вальц, Г. Вишерс – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 80 с.
19. Горчаков, Г.И. Повышение трещиностойкости и водостойкости легких бетонов для ограждающих конструкций / Г.И. Горчаков, Л.П. Оrentлихер, И.И. Лифанов, Э.Г. Мурадов ; под ред. Г.И. Горчакова. – М.: Стройиздат, 1971. – 159 с.
20. Довжик В.Г. Технология высокопрочного керамзитобетона / В. Г. Довжик, В. А. Дорф, В.П. Петров. – М.: Стройиздат, 1976. – 136 с.

21. Звездов, А.И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре / А.И. Звездов, В.Р. Фаликман // Деловая слава России. – 2010. – № 4. – С. 106-109.
22. Иванов, И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях /И.А. Иванов.— М.: Стройиздат, 1993.—182 с —ISBN 5-274-00822-4.
23. Кондращенко В.И. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении / В.И. Кондращенко, В.Н. Ярмаковский, С.В. Гузенко // Транспортное строительство. – 2007. – №9. – С. 10-13.
24. Макридин, Н.И. Механические свойства керамзитового гравия при осевом сжатии / Н.И. Макридин, В.А. Тяпкин // Строительные материалы. – 1977. – № 9. – С. 26-28.
25. Макридин, Н. И. Влияние степени водосодержания керамзита на его прочностные характеристики и изменения структуры / Н. И. Макридин, С.К. Нежданов. // Структура и деформативность легких и некоторых специальных бетонов. Тр. ин-та. – Пенза Пенз.ИСИ, 1970. – Вып. V. – С. 20—26.
26. Матросов Ю.А. Рекомендации по проектированию тепловой защиты и энергоэффективности высотных зданий / Ю.А. Матросов, В.Н. Ярмаковский // Информационный сборник N2 Новые материалы, конструкции, оборудование и технологии в строительном комплексе г. Москвы, Центр новых строительных технологий. – М. – 2005 г.
27. Мешкаускас, Ю.И. Конструктивный керамзитобетон / Ю.И. Мешкаускас – М.: Стройиздат, 1977. – 83 с.
28. Орендлихер, Л.П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях / Л.П. Орендлихер – М.: Стройиздат, 1988. – 136 с
29. Онацкий С.П. Производство керамзита / С.П. Онацкий. – М.: Стройиздат, 1987. – 330 с.
30. Попов, Н.А. Новые виды легких бетонов \ Н.А. Попов. – М.: Стройиздат. – 193 с.
31. Симонов, М.З. Основы технологии легких бетонов / М.З. Симонов – М.: Издательство литературы по строительству, 1973. – 584 с.



32. Спивак, Н.Я. Крупнопанельные ограждающие конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Н.Я. Спивак. – М.: Стройиздат, 1964. – 108 с.
33. Стронгин, Н.С. Легкобетонные конструкции крупнопанельных жилых домов / Н.С. Стронгин, Д.К. Баулин. – М.: Стройиздат, 1984 – 184 с.
34. Шорт, А. Легкие бетоны; Проектирование и технология: Пер. с англ./ А. Шорт и др. – М.: Стройиздат, 1981. —238 с.
35. Ямлеев, У.А. Технология производства легкобетонных конструкций / У.А. Ямлеев, Г.В. Анциферов. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
36. Ярмаковский, В.Н. Легкий бетон: настоящее и будущее / В.Н. Ярмаковский., Т.У. Бремнер // Строительный эксперт. – 2005. – № 20. – С.3-4.
37. Зайченко Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой / Н.М. Зайченко. – Монография. Макеевка: ДонНАСА, 2009 – 207 с.
38. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete / EuroLightCon - Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete: Document BE96-3942/R23, June 2000 – 50 pp.
39. ENV 1992—Euro Code No 2: Design of Concrete Structures Parts 1–4: The use of lightweight aggregate concretes with closed structures / Final Draft. – 1992.
40. Болдырев, А.С. Технический прогресс в промышленности строительных материалов / А. С. Болдырев, В. И. Добужинский, Я.А. Рекитар. – М.: Стройиздат, 1980. – 396 с.
41. Горин, В.М. Состояние и перспективы производства и применения керамзита и керамзитобетона в стройкомплексе России / В.М. Горин, Т.А. Токарева, М.К. Кабанова // Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 26-27.
42. Kenneth S. Engineering properties of structural lightweight concrete [электрон. ресурс] / S. Kenneth, P.E. Harmon // <http://www.stalite.com/uploads/EngineeringProperties.pdf>.

43. Zhang, M.H. Development of high-strength lightweight concrete / M.H. Zhang, O.E. Gjorv // ACI Spe Pub. – 1990. – 121:667–82 p.
44. Shannag M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures / M.J. Shannag // Constuction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 658-662.
45. AS 3600: Concrete structures / Standards Association of Australia. – Sydney. – 1988.
46. NS 3473: Concrete structures / Norwegian Council for Building Standardisation. – 1989.
47. ACI 318–89: Requirements for reinforced concrete / ACI. – Detroit – 1989.
48. Standard specification for design and construction of concrete structures, Part 1 (Design) / Japan Society of Civil Engineers – Tokyo. – 1986.
49. ENV 1992—Euro Code No 2: Design of concrete structures, Part 1: General rules and rules for buildings / Final text. – EEC – 1991.
50. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы / В.Г. Батраков // Строительные материалы. – № 10. – 2006. – С. 4-7.
51. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
52. Прокопец, В.С. Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.А. Подрез // Строительные материалы. – 2009. – № 11. – С. 26-28.
53. Lightweight Aggregate Concrete. Codes and standards. State-of-art report prepared by Task Group 8.1. CEBFIP (fib), Stuttgart, – 1999. – 44 p.
54. Lightweight Aggregate Concrete. Recommended extensions to Model Code 90. International Federation for Structural Concrete (fib). Task Group 8.1. – Stuttgart, 2000. – 258 p.
55. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures. – Vol. II: 3rd edition CEB. – Paris. – 1978.

56. Dunbeck, J. Evaluation of High Strength Lightweight Concrete Precast, Prestressed Bridge Girders, Master's Thesis // Georgia Institute of Technology, - 2009, - 186 pp.

57. Житкевич, Р.К. Высокопрочный легкий бетон / Р.К. Житкевич, К.М. Кац // Всесоюзный семинар «Эффективные конструкции из легких бетонов» Тезисы докладов. Госстрой СССР. – М. – 1980. – С. 73-75.

58. Деллос, К.П. Несущие специальные конструкции из легких бетонов / К.П. Деллос // Всесоюзный семинар «Эффективные конструкции из легких бетонов»: тезисы докладов. – М.: Госстрой СССР, 1980. – С. 100-103.

59. Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении / Транспортное строительство. – №9. – 2007. – С. 10-13.

60. Хаисон, Дж. Замена легкого заполнителя природным тяжелым песком в конструктивном легком бетоне / Дж. Хаисон // Journal the American Concrete Institute. – №7 – 1964. – 61 pp.

61. Шейрп, Н.Р. Сравнение использования легкого бетона в Нью-Йорке и Лондоне / Н.Р. Шейрп // Civil Engineering and Public Review. – № 697 – 1964 – 59 pp.

62. Hoff, G.C. The Use of Lightweight Fines for Internal Curing of Concrete / G.C. Hoff Report prepared for Northeast Solite Corporation: Mississippi, Clinton: Hoff Consulting LLC. – August 20, 2002. – 44 pp.

63. Pease B.J. The role of shrinkage-reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking / Bradley J. Pease // Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering submitted to the Faculty of Purdue University, 2005. – 236 pp.

64. Project Summary Report 0-4098-S "Use of Innovative Materials to Control Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks: A Summary" / K. Folliard, C. Smith, M. Brown, G. Sellers // the University of Texas at Austin: Center for Transportation Research. – October 2003. – 4 pp.

65. Use of Innovative Materials to Control Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks: A Summary / K. Folliard, C. Smith, M. Brown, G. Sellers //

Project Summary Report 0-4098-S: Use of Innovative Materials to Control Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks. – Center for Transportation Research: The University of Texas at Austin, October 2003. – P. 1-4.

66. Canpolat F. SRAs – RECENT STUDIES. Report No. CBU-2003-50, REP-543 / F. Canpolat, T.R. Naik // the University of Wisconsin – Milwaukee: Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science. – December 2003. – 18 pp.

67. Performance and Mechanism of a Multi-Functional Superplasticizer for Concrete / Q. Ran, C. Miao, J. Liu, S. Wu, J. Shen // Materials Transactions. – 2006. – Vol. 47, No. – P. 1599-1604

68. Clarke C. Concrete Shrinkage Prediction Using Maturity and Activation Energy / Christopher Clarke // Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, for the degree of Master of Science, 2009. – 115 pp.

69. Holland T. Using shrinkage-reducing admixtures. Will these new products allow us to abandon the notion that all concrete must crack? / T. Holland // The Aberdeen Group a division of Hanley-Wood, Inc: Publication C99C015, 1999. – 3 pp.

70. Mora-Ruacho J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete // J. Mora-Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141-146.

71. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage / J. Saliba, E. Rozière, F. Grondin, A. Loukili // Cement and Concrete Composites. – 2011. – Vol. 33. – P. 209-217.

72. Cusson D. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking / D. Cusson, T. Hooegeveen // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – P. 757-765.

73. Effects of shrinkage-reducing admixture in shrinkage compensating concrete / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, JJ. Ogoumah Olagot, R. Troli // Concrete International. – 2005. – Vol. 27, No 10. – P. 1-8.

74. Lura P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete / Pietro Lura // PhD Thesis. – DUP Science. – Netherlands. – 2003. – 208 pp.

75. Lura P. Autogenous and drying shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete at early ages; the effect of specimen size / P. Lura, K. van Breugel, I. Maruyama // Proc. Int. Conference on Early Age Cracking in Cementitious Systems (EAC '01), March 2001, Haifa (Israel): RILEM. – 2001. – P. 79-88.

76. Bai Y. Properties of light-weight concrete manufactured with fly ash, furnacebottom ash and Lytag / Y. Bai, R. Ibrahim, P.A.M. Basheer // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. - Beijing, May 20-21, 2004. – P. 77-88.

77. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete / A. Sadrekarimi // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, No 3. – P. 409-417.

78. Subasi S. The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate / S. Subasi // Scientific Research and Essay. – Vol. 4 (4), April 2009. – P. 275-288.

79. Баженов Ю.М. Технология бетона: [науч. изд-е] / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с.

80. Баженов, Ю.М. Технология бетона: [науч. изд-е]/ Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.

81. ACI 213R-03 (Reapproved 1999) "Guide for Structural Lightweight Concrete" (ACI 213R-03) Reported by ACI Committee 213. – Copyright 2003: American Concrete Institute. – 2003.

82. ACI 211.2-98 (Reapproved 2004) "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete" (ACI 211.2-98) Reported by ACI Committee 211. – Copyright 1998: American Concrete Institute. – 2004.

83. Мещерин В. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения [Текст] / В. Мещерин // СтройПРОФИЛЬ. – 2008. – № 8(70). – С. 32-35.

84. Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash / I. De la Varga, J. Castro, D. Bentz, J. Weiss // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34. – P. 1001-1008.

85. Bentz D.P. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars / D.P. Bentz, M.R. Geiker, K.K. Hansen // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol. 31, No . – P. 1075-1085.

86. Hua C. Analyses and models of autogenous shrinkage of hardening cement paste [Текст] / C. Hua, P. Acker, A. Ehrlacher // Cement and Concrete Research. – 1995. – Vol. 25, No 7. – P. 1457-1468.

87. ACI 116 R-00 (Reapproved 2004) "Cement and Concrete Terminology" Reported by ACI Committee 116. – Detroit Michigan: American Concrete Institute, 2000. – 25 p.

88. Lura, P. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms / P. Lura, O.M. Jensen, K. Breugel // Cement and Concrete Research. – Vol-33 – 2003. – pp. 223–232.

89. Geiker, M.R. Mitigating Autogenous Shrinkage by Internal Curing in ACI SP-218, High Performance Structural Lightweight Concrete / M.R. Geiker, D.P. Bentz, O.M. Jensen - :Eds. J.P. Ries and T.A. Holm – American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, - 2004. – pp. 143-154

90. Jensen, O.M. Autogenous relative humidity change in silica fume-modified cement paste / O.M. Jensen, P.F. Hansen //Advances in Cement Research. – Vol-25(7). – 1995. – p. 33-38.

91. Jensen, O.M. Clinker mineral hydration at reduced relative humidities / O.M. Jensen et al. // Cement and Concrete Research. – Vol-29(9). – 1999. – p. 1505-1512.

92. Jensen, O.M. Autogenous phenomena in cement-based materials / O.M. Jensen. – Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University –2005 – 188 pp. ISBN 87-91606-00-4.

93. Руководство по проектированию к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций: Руководство для проектировщиков к EN 1992-1-1 и EN

1992-1-2. Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций. Общие правила и правила для зданий. Противопожарное проектирование строительных конструкций / Э.Б. Биби, Р.С. Нараянан; ред. серии Х. Гульванесян; перев. с англ. – М.: МГСУ, 2012. – 292 с.

94. Jensen, O.M. Water-entrained cement-based materials – I. Principle and theoretical background / O.M. Jensen, P.F. Hansen // Cement and Concrete Research. – Vol-31 (4). – 2001. – p.647-654.

95. Sakulich, A.R. Incorporation of Phase Change Materials in Cementitious Systems via Fine Lightweight Aggregates / A.R. Sakulich, D.P. Bentz // Construction and Building Materials. – Vol-35,. – 2012. – p. 483-490.

96. Bentur, A. Prevention of Autogenous Shrinkage in High Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates / A. Bentur, S. Igarishi, K. Kovler // Cement and Concrete Research. – Vol-31(11). – 2001. – pp.1587-1591.

97. Bentz, D.P. Mitigation Strategies for Autogenous Shrinkage Cracking / D.P. Bentz, O.M. Jensen // Cement and Concrete Composites. – Vol- 26 (6). – 2004. – pp.677-685.

98. Jensen, O.M. Autogenous deformation and rh-change in perspective / O.M. Jensen, P.F. Hansen // Cement and Concrete Research. Vol- 31(12). – 2001. – p.1859–65.

99. Kovler, K. Novel techniques for concrete curing / K. Kovler, O. Jensen // Concrete International. – Vol-27 (9). – 2005. – pp. 39–42.

100. Bentz D.P. Protected paste volume in concrete. Extension to using saturated lightweight fine aggregate / D.P. Bentz, K.A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, No . – P. 1863-1867.

101. Jiang Z. Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes / Z. Jiang, Z. Sun, P. Wang // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 1539– 1545.

102. Aïtcin P.C. Review – Cement of yesterday and today. Concrete of tomorrow / P.C. Aïtcin // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30. – p. 1349-1359.

103. Aïtcin P.C. The Art and Science of High-Performance Concrete / P.C. Aïtcin // Mario Collepardi Symp. on Advances in Concrete Science and Technology, 1997: Proc. – Rome (Italy), 1997. – P. 107-126.

104. Drying/hydration in cement pastes during curing / D.P. Bentz, K.K. Hansen, H.D. Madsen, F. Vallée, E.J. Griesel // Materials and Structures. – November 2001. – Vol. 34, No. 243. – P. 557-565.

105. Jensen O.M. Thermodynamic limitation of self-dessication [Текст] / O.M. Jensen // Cement and Concrete Research. – 1995. – Vol. 25, No 1. – P. 157-164.

106. Афанасьева В.Ф. Дефекты в конструкциях в процессе строительства и современные приемы их устранения [Текст] / В.Ф. Афанасьева // Технологии бетонов. – 2014. – № 7. – С. 33-37.

107. Curing of Concrete. Datasheet // Cement Concrete & Aggregates Australia. – April 2006. – 7 pp.

108. Ковлер К. Как сделать хороший бетон еще лучше? Новые и традиционные технологии ухода за бетоном [Текст] / К. Ковлер, Оле М. Йенсен, В. Фаликман // Технологии бетонов. – 2005. – № 1. – С. 52-55.

109. Henkenseifken, R. Water Absorption in Internally Cured Mortar Made with Water-Filled Lightweight Aggregate / R. Henkenseifken, J. Castro, D. Bentz, and others // Cement and Concrete Research, - Vol-39 (10). – 2009. – p 883-892.

110. Henkenseifken, R. Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions / R. Henkenseifken, D. Bentz, T. Nantung, J Weiss // Cement and Concrete Composites. – Vol- 31(7). – 2009. – p.427–37.

111. Powers T.C. Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process / T.C. Powers // Ind. Eng. Chem. Vol-27(7). – 1935. – p.790–794.

112. Powers, T.C. The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland-Cement Paste: Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination / T.C. Powers // ASTM – American Society for Testing Materials: Philadelphia. – 1949. – p. 68-76.



113. Powers, T.C. Capillary continuity or discontinuity in cement pastes / T.C. Powers, L.E. Copeland, H.M. Mann // Portland Cement Association Research and Development Labs. – No. 2. – 1959. – pp 38-48.
114. Bentz, D.P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars / D.P. Bentz // Cement and Concrete Composites. – Vol- 31(5). – 2009. – p.285–9.
115. Bentz, D.P. Mixture proportioning for internal curing / D.P. Bentz, P Lura, J.W. Roberts //Concrete International. – Vol- 27(2). – 2005 – p.35–40.
116. Lura, P. Experimental Observation of Internal Water Curing of Concrete / P. Lura, O.M. Jensen, S.I. Igarashi // Materials and Structures. – Vol-40. – 2007. – p. 211-220.
117. Lura, P. On the Origin of Eigenstresses in Lightweight Aggregate Concrete / P. Lura, J. Bisschop // Cement and Concrete Composites, - Vol-26 (5). – 2004. – p 445-452.
118. Zhutovsky, S. Influence of Wet Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages / S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur // Materials and Structures. – Vol-35. – 2002. – p. 97-101.
119. RILEM Report 41. Internal curing of concrete – state of the art. In: Kovler K, Jensen O.M. editors. RILEM Publications S.A.R.L; 2007. – p. 161.
120. Ackay, B. Effects of Distribution of Lightweight Aggregates on Internal Curing of Concrete / B. Ackay, M.A Tasdemir // Cement and Concrete Composites. – Vol-32 (10). – 2010. – p. 611-616.
121. Ackay, B. Optimization of Using Lightweight Aggregates in Mitigating Autogenous Deformation of Concrete / B. Ackay, M.A Tasdemir // Construction and Building Materials. – Vol-23. – 2009. – pp.353-363.
122. Bashir, A. Performance of Pre-Wetted Sawdust as a source of Internal Curing of Concrete / A. Bashir, U. Zahid, U.J. Faheem and others // International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering. – Vol. 01. – No. 02. – 2012.

123. Browning, J. Lightweight Aggregate as Internal Curing Agent to Limit Concrete Shrinkage / J. Browning, D. Darwin, D. Reynolds, and other // ACI Materials Journal. – Vol-108 (6). – 2011. – pp. 638-644.

124. Dayalan, J. Internal curing of concrete using prewetted light weight aggregates / J. Dayalan, M. Buellah // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – Vol-3 (3). – 2014. – pp. 10554–10560

125. Golias, M. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing / M. Golias, J. Castro, J. Weiss // Construction and Building Materials. – Vol- 35. – 2012 – pp. 52–62.

126. Meddah, M.S. Effect of Curing Methods on Autogenous Shrinkage and Self-Induced Stress of High-Performance Concrete / M.S. Meddah, R. Sato // ACI Materials Journal. – Vol- 107 (1). – 2010. – pp. 65-74.

127. Mather, B. Self Curing Concrete, Why Not? / B. Mather // Concrete International. – Vol-23 (1)/ - 2011. – p.46-47.

128. Paul, A. Assessing Lightweight Aggregate Efficiency for Maximizing Internal Curing / A. Paul, M. Lopez // ACI Materials Journal. – Vol-108 (4). – 2011. – p. 385-393.

129. Sahmaran, M. Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. / M. Sahmaran, M. Lachemi, , K. Hossain, and others // Cement and Concrete Research. – Vol-39. – 2009. – pp. 893–901

130. Weber, S.R. A blend of aggregates to support curing of concrete / S.R. Weber // Proceedings International Symposium Structural Lightweight Aggregate: Holland, Hammer, Fluge Sandefjord. – Norway. – 1995. – pp 662-671.

131. Yasar, E. High strength lightweight concrete made with ternary mixtures of cement-fly ash-silica fume and scoria as aggregate / E. Yasar, C.D. Atis, A. Kilic// Turkish J. Eng. Env. Sci. – 2004. – Vol. 28. – P. 95-100.

132. Hansen W. Report on Early-Age Cracking: A summary of the latest document from ACI Committee 231 / W. Hansen // Concrete international. – March 2011. – P. 48-51.

133. New method for determination of absorption capacity of internal curing agents / N.A. Johansen, M.J. Millard, A. Mezencevova, V.Y. Garas, K.E. Kurtis // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 65-68.

134. Philleo, R. Concrete science and reality / R. Philleo // Material Science of Concrete II, American Ceramic Society. – 1991. – pp 1-8.

135. Zhutovsky S. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete / S. Zhutovsky, K. Kovler // Cement and Concrete Research. – 2012. – Vol. 42, No . – P. 20-26.

136. Захезин А.Е. Цементные дорожные бетоны с комплексными добавками на основе алифатических эпоксидных смол : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.Е. Захезин. – Челябинск : ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет", 2010. – 19 с.

137. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны: [науч. изд-е] / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.

138. ASTM C 39/C 39M – 03 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens // ASTM International – West Conshohocken Pennsylvania 19428-2959, United States 2007. – 5 pp.

139. Jensen, O.M. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste / O.M. Jensen, P.F. Hansen // Materials and Structures. – Vol-181(28). – 1995. – p. 406-409.

140. Jensen, O.M. Rotronic Hygroskop DT. Fugtmåleudstyr - kalibrering og afprøvning / O.M. Jensen –Kbh.: DTH, Technical University of Denmark, 1993. – P. 282

141. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая шк., 1981. – 335 с.

142. Тейлор Х. Химия цемента / Хэл Тейлор; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

143. Lopez, M. Characterization of elastic and time-dependent deformations in high performance lightweight concrete by image analysis / M. Lopez, L.F. Kahn, K.E. Kurtis // *Cement and Concrete Research*. – Vol-39(7). – 2009. – p.610–9.
144. Lopez, M. Creep and Shrinkage of High Performance Lightweight Concrete: A Multi-scale Investigation: Doctoral Thesis / M. Lopez. – Georgia Institute of Technology, 2005. – 530 pp.
145. Castro, J. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures / J. Castro, L. Keiser, M. Goliass, J. Weiss // *Cement & Concrete Composites*. – Vol-33. – 2011. – pp. 1001–1008.
146. Gambhir, M.L. *Concrete Technology: Theory and Practice: Fifth Edition* / Murari Lal Gambhir – Tata McGraw-Hill Education, 2013. – 763 p.
147. Craig, P. Another look at the drying of lightweight concrete: A comparison of drying times for normalweight and lightweight floors / P. Craig, B. Wolfe // *Concrete international*. – January 2012. – pp. 53–56.
148. Holm, T.A. *High Strength Lightweight Aggregate Concrete* / T.A. Holm, T.W. Bremner // Chapter 10, *High Performance Concrete and Applications*, Shaw, S. P., and Ahmad, S.H. :Ed., Edward Arnold. – London. – 1994.
149. Holm, T.A. *Performance of Structural Lightweight Concrete in a Marine Environment* / T.A. Holm // *ACI Special Publication SP-65, Performance of Concrete in a Marine Environment*, CANMET/ACI International Conference. – St. Andrews-By-The Sea, Canada: Editor, V.M. Malhotra. – 1980
150. Fergestad S. *Design of Bridges and Offshore Structures using LWA Concrete* / S. Fergestad, T. Hagen // *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*; Edited by Holand I., Hammer T. A., and Fluge, F. – Sandefjord, June – 1995.
151. Mack, E.C. *Using Internal Curing to Prevent Concrete Bridge Deck Cracking*; M.S. Thesis / E.C. Mack. – Cleveland State University. – 2006.

152. Meyer, K.F. Transfer Length and Development of 0.6-inch Diameter Prestressing Strand in High Strength Lightweight Concrete: Doctoral Thesis / K.F. Meyer – Georgia Institute of Technology, 2002. – 616 pp.
153. Turner-Fairbank Highway Research Center. Criteria for designing lightweight concrete bridges. – 1985. - № FHWA /RD-85/045. – P. 83-99.
154. ДБН В.2.7-31:2006 Теплова ізоляція будівель: Київ МинБАЖКГ, 2006 г. С. 73.
155. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин, Изд.4-е, перераб. И доп. –М: Стройиздат, 1973 – 287 с.
156. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: Київ, 2009 г. –71 с.
157. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: Москва, 2013 – 161 с.
158. БНВ.11-7-2002 Пожарная безопасность объектов строительства Госстроя Украины: Киев, 2003 – 44 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»

СОГЛАСОВАНО:

Директор ООО "Донспецпром"


 \_\_\_\_\_ Джуган Г.В.

Заведующая лабораторией


 \_\_\_\_\_ Федосова Ж.В.

« 8 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 201 6 г.

УТВЕРЖДАЮ:

 Проректор по научной работе  
Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры

Д.т.н., профессор


 \_\_\_\_\_ Мушанов В.Ф.


« 8 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 201 6 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ПРОИЗВОДСТВА  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

РАЗРАБОТАНО:

заведующий кафедрой ТСКИиМ


ГОУ ВПО ДонНАСА


 \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор  
Зайченко Н.М.

« 8 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 201 6 г.

ассистент каф. ТСКИ и М

ГОУ ВПО ДонНАСА


 \_\_\_\_\_ Лахтарина С.В.

« 8 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 201 6 г.

**Технологический регламент производства высокопрочных легких бетонов / Разраб. Зайченко Н.М., Лахтарина С.В. – Макеевка: ДонНАСА. – 2015. – с.**

### **Сведения о регламенте**

1. РАЗРАБОТАН: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (д.т.н., проф. Зайченко Н.М., ассистент Лахтарина С.В.)
2. ВНЕСЕН: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
3. УТВЕРЖДЕН: проректор по научной работе ДонНАСА, д.т.н., проф. Муцанов В.Ф.
4. СОГЛАСОВАН: директор ООО "Доспецпром" Джуган Г.В., зав. лабораторией Федосова Ж.В.
5. Регламент разработан 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")

	Стр.
Введение .....	137
1. Общие сведения .....	137
2. Область применения .....	138
3. Упомянутые стандарты .....	138
4. Термины и определения .....	140
5. Технические требования .....	141
5.1. Легкие бетоны.....	141
5.2. Бетонные смеси.....	141
5.3. Требования к исходным материалам.....	142
5.3.1. Цемент .....	142
5.3.2. Минеральные добавки .....	142
5.3.3. Заполнители .....	143
5.3.4. Химические добавки .....	145
5.3.5. Вода затворения .....	146
6. Состав конструкционных легких бетонов, принципы проектирования состава .....	146
6.1. Проектирование состава бетона.....	147
7. Приготовление бетонной смеси.....	148
7.1. Общие сведения.....	149
7.2. Хранение составляющих материалов .....	149
7.3. Оборудование для перемешивания и пробные замесы .....	150
7.4. Процедура приготовления бетонной смеси в заводских условиях .....	150
7.4.1. Автобетоносмесители.....	152
7.4.2. Смесители непрерывного действия .....	153
8. Контроль производства .....	153
8.1. Компоненты бетонной смеси.....	153
8.2. Производство .....	154
9. Доставка бетонной смеси .....	154
9.1. Транспортировка и доставка .....	154
9.2. Прием бетона на строительной площадке .....	155



## Введение

Снижение материалоемкости и уменьшение массы строительных конструкций без потери их несущей способности и других эксплуатационных свойств является одним из основных факторов повышения эффективности строительства. Это особенно актуально для высотного строительства, где одна из основных проблем связана с высокими сжимающими нагрузками, которые передаются от верхних этажей зданий и сооружений нижним, а также высоким давлением на грунты. Большие нагрузки на вертикальные несущие конструкции приводят к увеличению сечений элементов, что отрицательно сказывается на объемно-планировочных решениях зданий. Одновременно возникает необходимость в повышении процента армирования конструкций, что приводит к удорожанию стоимости объекта. Практическим способом решения этой задачи является разработка и применение легких бетонов с повышенными показателями коэффициента конструктивного качества (ККК).

К конструкционным легким относятся бетоны, производимые с применением легких пористых заполнителей, характеризующиеся пределом прочности при сжатии больше 17,2 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и средней плотностью не более 2000 кг/м<sup>3</sup>. При этом высокопрочными легкие бетоны принято считать в случае, когда выполняется условие:  $f_{сж} / \rho_0 \geq 25$  (где  $f_{сж}$  – прочность при сжатии, Н/мм<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм<sup>3</sup>) – соотношение, которое по сути и определяет коэффициент конструктивного качества.

### 1. Общие сведения

Технологический регламент разработан для использования на заводах или строительных площадках при производстве бетонных и железобетонных изделий из самоуплотняющихся бетонов.

Технологический регламент распространяется на модифицированные органиано-минеральными добавками высокопрочные легкие бетоны, характеризующихся повышенным коэффициентом конструктивного качества и улучшенными

деформационными свойствами, на основе концепции внутреннего ухода за бетоном.

Технологический регламент является основным нормативным документом, который дает возможность обеспечить выпуск продукции заданного качества, безопасность условий труда.

## **2. Область применения**

В практике современного строительства с каждым годом всё большее распространение получают конструкции из высокопрочного лёгкого бетона. Наибольшее распространение высокопрочный лёгкий бетон получил в США. Растёт его применение в Украине, России, Австралии, Канаде, Великобритании, Германии и других странах.

Высокопрочный лёгкий бетон наиболее широко применяют для изготовления несущих конструкций, работающих на изгиб, где собственная масса составляет значительную долю от полной нагрузки (большепролетные мосты), а также в многоэтажных каркасах зданий, перекрытиях, несущих стенах, покрытиях в виде сводов–оболочек, в преднапрягаемых элементах всех типов, в объектах дорожной инфраструктуры и офшорной зоны. В некоторых случаях, архитектурное выражение формы здания, в комбинации с его несущей способностью, может быть достигнуто только за счет применения высокопрочных легких бетонов. Многие архитекторы, инженеры-проектировщики и строительные организации отмечают ряд преимуществ легких высокопрочных бетонов наряду с тяжелыми, руководствуясь большим количеством реализованных уникальных проектов в мировой практике строительства.

## **3. Упомянутые стандарты**

В настоящем технологическом регламенте использованы ссылки на следующие нормативные стандарты:

ДСТУ Б В.18 95 Бетоны легкие. Общие технические условия.

ДСТУ Б В.2.6-2-95 Конструкции домов и сооружений. Изделия бетонные и железобетонные. Общие технические условия.

ДСТУ Б В.2.7-32-95 Песок плотный природный для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Часть 1.

ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (EN 197-1) Цементы общестроительного назначения

ДСТУ Б В.2.7-75-98 Щебень и гравий плотные природные для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия.

ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия

ДБН А.3.1-7-96 Производство бетонных и железобетонных изделий

ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete

ACI 213R-03 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete

ASTM C127 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate

ASTM C 128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate

ASTM C 567 Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete

EN 197-1 Цемент - Часть 1: Состав, характеристики и критерии соответствия обычных цементов.

EN 206-1:2010 Бетон - Часть 1: Спецификация, характеристика, производство и соответствие.

EN 1008 Вода затворения для бетонов – Специфика для отбора проб, тестирования и оценки пригодности воды, в том числе воды, извлеченного из процессов бетонного производства, а именно воды затворения для бетонов

EN 12350-1 Испытание свежеприготовленного бетона: Часть 1: Отбор проб

EN 12620 Заполнители для бетона

EN ISO 9001 Система управления качеством – Требования.

EN 206-1:2010 "Бетон – Часть 1: Общие технические требования, производство и контроль качества"

#### **4. Термины и определения**

Для данного технологического регламента применяются следующие определения:

**1. Вяжущее вещество:**

Портландцемент I типа

**2. Добавка:**

Материал добавляют во время процесса перемешивания бетона в небольших количествах от массы вяжущего, чтобы изменить свойства свежеприготовленной бетонной смеси или бетона.

**3. Запатентованный бетон:**

Бетон, изготовленный производителем, соответствующий заявленным характеристикам. Состав бетона является интеллектуальной собственностью.

**4. Минеральные наполнители-добавки:**

Тонкоизмельченные дисперсные материалы природного или техногенного происхождения, добавляемые в бетонную смесь для придания специальных свойств или улучшения некоторых характеристик. Согласно EN 206-1, подразделяются на два типа неорганических добавок:

- активные (тип I);
- инертные (почти инертные) добавки (тип II).

**5. Надёжность:**

Способность бетона сохранять свои свойства при небольших изменениях в свойствах или количестве составляющих материалов.

**6. Органо-минеральный модификатор:**

Получают, объединяя органический и минеральный компоненты, которые обладают модифицирующим эффектом.

**7. Обеспечение качества:**

Это процесс или результат формирования требуемых свойств и характеристик продукции по мере её создания, а также – поддержание этих характеристик при хранении, транспортировании и эксплуатации продукции.

**8. Паста:**

Часть бетонной смеси, состоящая из тонкодисперсных компонентов, воды и воздуха.

**9. Подвижность бетонной смеси:**

Способность бетона заполнять форму.

**10. Подвижность (расплыв конуса):**

Характеризует текучесть бетонной смеси в неограниченных условиях.

**11. Растворная часть:**

Часть бетона, содержащая пасту вяжущего и заполнители с размером зерен менее 4 мм.

**12. Конструкционный легкий бетон (SLWAC, КЛБ):**

Бетон, с применением в составе пористых заполнителей или комбинацией плотных и пористых заполнителей, с показателем средней плотности в высушенном состоянии не более  $2000 \text{ кг/м}^3$ .

## **5. Технические требования**

### **5.1. Легкие бетоны**

Конструкционные легкие бетоны характеризуются пределом прочности при сжатии от 34 до 69 МПа при значении средней плотности в высушенном состоянии согласно ASTM C 567 «Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete» не более  $2000 \text{ кг/м}^3$ . Европейским стандартом EN 206-1 для конструкционных легких бетонов установлены диапазоны средней плотности от 1,1 до  $2,0 \text{ кг/дм}^3$ , и по прочности при сжатии – классы от LC8/9 до LC 80/88. В действующих стандартах на территории Украины ДСТУ Б В.18 95 «Бетоны легкие. Общие технические условия» и России ГОСТ 25820-2000 «Бетоны легкие. Технические условия» также установлены диапазоны средней плотности до  $2000 \text{ кг/м}^3$  в зависимости от вида пористого заполнителя при максимальном значении класса бетона В40.

### **5.2. Бетонные смеси**

Смеси, предназначенные для изготовления изделий и конструкций вибрационным и литьевым способами, должны соответствовать требованиям ГОСТ

7473 и характеризоваться жесткостью или подвижностью, показатель которых назначается по технологическим регламентам производства.

Объем межзерновых пустот в уплотненной бетонной смеси для бетона плотной и поризованной структур не должен превышать 3%.

Объем вовлеченного воздуха, при перемешивании должен находиться в пределах 4,5-7,5 %. Объем вовлеченного в смесь воздуха, образующегося при использовании добавок, изменяющих поровую структуру бетона, не должен превышать 12%.

### **5.3. Требования к исходным материалам**

#### **5.3.1. Цемент**

Все цементы, отвечающие требованиям ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (EN 197-1), могут быть использованы для производства конструкционных легких бетонов. Обоснование выбора типа цемента, как правило, диктуется конкретными требованиями по области применения и условий эксплуатации строительной конструкции, изготовленной из легких бетонов.

#### **5.3.2. Минеральные добавки**

Высокопрочные легкие бетоны характеризуются более высоким содержанием цемента, чем тяжелые бетоны аналогичного класса прочности. С целью уменьшения себестоимости конструкционных легких бетонов, путем снижения расхода цемента, в состав легких бетонов вводят пуццолановые минеральные добавки. Также, использованием добавок можно регулировать содержание цемента с целью уменьшения теплоты гидратации и риска термического трещинообразования.

##### *5.3.2.1. Зола-унос*

Зола-унос является эффективной добавкой для легких бетонов, что обеспечивает повышенную когезию и пониженную чувствительность к изменениям содержания воды. Однако, высокие расходы золы-уноса могут привести к образованию вяжущей пасты с очень высокой когезией, что снизит показатели удобоукладываемости, в то же время, уменьшить теплоту гидратации цемента.

#### *5.3.2.2. Микрокремнезем согласно ASTM C 1240*

Очень высокий уровень дисперсности и практически сферическая форма зерен микрокремнезема (кремнеземистой пыли) обеспечивает надлежащую когезию и повышение показателей прочности бетона. Однако микрокремнезем также является очень эффективным для уменьшения или ликвидации водоотделения, что может привести к проблеме обеспечения качества поверхности в связи с быстрым образованием поверхностной корки, которая затрудняет выполнение операций по доводке изделий.

#### *5.3.2.3. Молотый доменный гранулированный шлак согласно ASTM C 989.*

Молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ) содержит тонкодисперсные реакционно способные фракции с низкой теплотой гидратации. МДГШ уже присутствует в некоторых типах цемента (ПЦ II или ШПЦ III), но также может использоваться как добавка к бетонным смесям. При этом следует учитывать, что высокое содержание МДГШ может влиять на удобоукладываемость бетона, а его очень медленная гидратация увеличивает риск сегрегации и водоотделения.

#### *5.3.2.4. Другие добавки*

Метакаолин согласно ASTM C 618, природные пуццоланы, молотый шлак ТЭС, микросферы и другие мелкие наполнители могут также использоваться как добавки для высокопрочных легких бетонов, но их эффективность должна быть тщательно и индивидуально оценена как для краткосрочных, так и долгосрочных воздействий на бетон.

### **5.3.3. Заполнители**

Основными свойствами, влияющие на характеристики конструкционных легких бетонов, является тип пористого заполнителя, наибольший номинальный размер зерен, гранулометрический состав и форма зерен, их прочностные характеристики, водопоглощение, пористость, насыпная плотность и плотность зерен пористого заполнителя в цементном тесте.

Требования к максимальному размеру зерен заполнителя, что приведено в нормативных документах для обычного бетона (например, Пособие к ДБН А.3.1-

7-96), - менее трети минимальной толщины изделия и трех четвертей расстояния между стержнями арматуры (кроме случаев, оговоренных в проекте), как правило, применяются и к легким бетонам. Использование гравиеподобных заполнителей фракции 20-40 мм при монолитном способе строительства не допускается. Уменьшение наибольшей крупности зерен заполнителя может положительно влиять на показатели удобоукладываемости бетонной смеси и увеличение прочности бетона. Однако эти преимущества должны оцениваться с учетом необходимости увеличения объема вяжущего вещества и связанным с этим прямого или косвенного влияния на свойства затвердевшего бетона.

Крупные пористые заполнители по насыпной плотности выбирают в зависимости от их назначения, структуры бетона, требований к прочности и средней плотности бетона, вида свойств применяемого мелкого заполнителя, формы крупного заполнителя. Марка по насыпной плотности для легкого конструкционного бетона не должна превышать 1200. Следует избегать явно выраженной прерывистой гранулометрии заполнителя, в то время как отсутствие некоторых фракций в смеси заполнителей может быть приемлемой. Хотя зерновой состав заполнителей существенно влияет на реологические (технологические) свойства бетонных смесей.

В качестве мелкого заполнителя при изготовлении конструкционных легких бетонов рекомендуется использовать пористые, природные пески или их смеси. Зерновой состав песков должен соответствовать требованиям ГОСТ 8736.

Значение влажности, пористости и водопоглощения, заполнителей должны постоянно контролироваться, их отклонения от нормативных значений для крупных заполнителей (ASTM C127 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate) для мелких заполнителей (ASTM C 128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate) должны учитываться с целью получения легких бетонов постоянного качества.

При использовании легких заполнителей, которые имеют низкое значение влажности (обычно от 8 до 10 %) и относительно высокое значение водопогло-



щения, предпочтительнее перемешивать заполнители с половиной или  $2/3$  частью воды затворения в течение короткого промежутка времени до введения цемента, добавок, чтобы минимизировать потерю подвижности смеси. Также возможно использование предварительного водонасыщения пористого заполнителя, применение водонасыщенных заполнителей, но с сухой поверхностью (Saturated Surface Dry- SSD) однако, такая технология не всегда практична, особенно в зимний период. Самым простым, с технологической точки зрения, способом компенсации потери подвижности бетонной смеси, является введение избыточной воды затворения бетонной смеси, количество которой зависит от вида пористого заполнителя, количества, его водопоглощения в воде и пористости. Вода, которая находится в пористом заполнителе, будет обеспечивать водный внутренний уход за бетоном, в процессе гидратации цемента. Бетоны, изготовленные с применением предварительно водонасыщенных пористых заполнителей, имеют меньшие показатели морозостойкости, чем бетоны, изготовленные с сухими пористыми заполнителями.

### **5.3.4. Химические добавки**

Выбор добавок для оптимальных показателей качества конструкционных легких бетонов зависит от физических и химических свойств вяжущего / минеральной добавки. Такие факторы, как тонкость помола, содержание углерода (потери при прокаливании), щелочей и минерала  $C_3A$  могут иметь существенное влияние. Поэтому одним из основных условий правильного применения химических добавок является обязательное исследование их совместимости с минеральными компонентами. Это необходимо делать также в случаях изменения поставщика выходных компонентов бетона.

#### *5.4.4.1. Суперпластификаторы / добавки с высоким водоредуцирующим действием*

Добавка должна обеспечивать сокращение необходимого расхода воды затворения и запроектованные показатели удобоукладываемости. В то же время, добавка должна поддерживать свой диспергированный эффект в течение време-

ни, необходимого для транспортировки и укладки бетонной смеси. Необходимый уровень сохранения подвижности зависит от области применения. Бетон для сборных изделий и конструкций требует меньшей продолжительности сохранения подвижности, чем для монолитного строительства.

#### *5.4.4.2. Воздухововлекающие добавки*

Воздухововлекающие добавки могут быть использованы при производстве конструкционных легких бетонов с целью повышения морозостойкости бетона. Привлечение воздуха является особенно полезным для стабилизации свойств смесей с низким содержанием дисперсных компонентов, однако снижает прочность бетона.

### **5.3.5. Вода затворения**

Вода, используемая для приготовления конструкционных легких бетонов, должна соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-273:2011 (EN 1008).

## **6. Состав конструкционных легких бетонов, принципы проектирования состава**

Для получения высокопрочных легких бетонов используют те же технологические приемы, что и в технологии тяжелых высокопрочных бетонов: применение высокомарочных, в том числе композиционных цементов и максимально прочных пористых заполнителей; проектирование состава бетона с предельно низким водоцементным отношением; применение супер- и гиперпластификаторов в сочетании с микрокремнеземом или другими тонкодисперсными кремнеземистыми добавками; в ряде случаев осуществляют предварительную подготовку легкого заполнителя (водонасыщение, активация поверхности, гидрофобизация и др.); особо тщательное перемешивание и уплотнение бетонной смеси с сохранением ее высокой однородности; создание благоприятных условий твердения.

Процесс подбора состава легких бетонов основан на оптимизации нескольких требуемых свойств, для соответствия проектным техническим условиям. Основными требуемыми свойствами легкого бетона, при подборе его состава являются экономичность при требуемом пределе прочности при сжатии и одновре-

менном обеспечении требуемой средней плотности, долговечности, и технологичности бетонных смесей, характеризующихся требуемой удобоукладываемостью.

Подбор состава легкого бетона производится по тому же принципу, что и тяжелого бетона, на основе расчетно-экспериментального метода, но с учетом особенностей свойств легких бетонов:

1) применение пористых заполнителей в силу их высокого водопоглощения и склонности к расслоению, приводит к необходимости увеличения расхода цементного теста и, следовательно, средней плотности бетона;

2) применение фракционирования не только крупного, но и “мелкого” заполнителя значительно сокращает расход цемента, и уменьшает расслоение смеси;

3) кривые зависимости прочности легкого бетона от В/Ц располагаются ниже кривых для обычного бетона, а достижение “предельной” прочности легкого бетона ограничено прочностью пористого заполнителя;

4) оптимальный расход воды достигается при получении бетонной смеси с минимальным коэффициентом выхода максимальной плотностью смеси.

### **6.1. Проектирование состава бетона**

Необходимо отметить, что не существует стандартного метода проектирования состава высокопрочного легкого бетона. Как правило, состав высокопрочного бетона – это подобранный опытно-экспериментальным путем состав, с учетом характеристик исходных компонентов бетонной смеси (в частности пористых заполнителей).

Процедура проектирования состава бетона включает выбор и определение основных свойств исходных материалов, выполнение расчета, проведения испытаний пробных замесов и корректировки состава КЛБ для достижения требуемых показателей качества.

Проектирование состава конструкционных легких бетонов производится экспериментально-расчетным путем с построением зависимости  $R_6=f(W)$ ,  $\rho_0=f(W)$  для конкретных условий.

Методика подбора состава конструкционных легких бетонов в данном технологическом регламенте основана на использовании комбинаций плотных и пористых заполнителей по объемному способу, описанному в ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

Подбор состава бетона ведется без варьирования зерновым составом, однако, с варьированием комплексного использования плотных и пористых крупных и мелких заполнителей.

Расход цемента марки 500 находится в пределах 510-615 кг/м<sup>3</sup> при использовании низкомарочных (прочность при сдавливании в цилиндре менее 2 МПа) крупных пористых заполнителей фракции 5-10 мм с одновременным использованием пористого песка в количестве 15-20% по объему. Общий объем заполнителей, определяется как объем в рыхло-насыпном состоянии, естественной влажности, в количестве 4 до 26% больше, чем 1 м<sup>3</sup> бетона. Из этой суммы, объем мелкозернистого заполнителя (плотного и пористого) может быть от 40 до 60% от общего объема заполнителей. Количество пористого заполнителя подбирается исходя из его формы и прочности зерна, для обеспечения требуемого значения прочности при сжатии и средней плотности легкого бетона, при минимальном расходе цемента.

Водоцементное соотношение назначается исходя из требований EN 206-1. Водоцементное отношение для конструкционных легких бетонов, как правило, ниже 0,45.

Дальнейшая корректировка состава будет необходима для обеспечения требований к затвердевшему бетону, в частности прочности, а также значения средней плотности бетона.

Эти принципы проектирования не являются конкретными рекомендациями по подбору состава легких бетонов, а приведенные пропорции ни в коей мере не являются ограничением.

## **7. Приготовление бетонной смеси**

Товарный бетон и бетон на строительной площадке

## **7.1 Общие сведения**

Производство легких бетонов следует проводить на предприятиях, где оборудование, его эксплуатация и материалы контролировались по схеме Quality Assurance. Рекомендуется (это является обязательным требованием в некоторых странах-членах ЕС), чтобы производитель был аккредитован в системе качества ISO 9001.

Важно, чтобы персонал, который будет участвовать в производстве и поставке КЛБ, получил надлежащую подготовку до начала производства от человека, имеющего опыт работы с легкими бетонами. Это обучение также может включать в себя наблюдение за приготовлением пробных партий и их поставки на строительную площадку.

## **7.2 Хранение составляющих материалов**

Хранение материалов, используемых для производства КЛБ, должно осуществляться так же, как и для обычного бетона. Однако, т.к. легкие бетоны более чувствительны к изменениям влажности, необходимо уделить внимание следующим аспектам:

Заполнители: должны храниться надлежащим образом, чтобы избежать перекрестного смешения между различными видами и фракциями, и защищены от внешней среды, чтобы минимизировать колебания влажности поверхности. Наземный запас должен храниться в специально построенных секционированных складах, которые позволят осуществлять дренаж избыточной влаги в заполнителях и дождевой воды.

Склады должны обладать достаточным запасом заполнителей, чтобы при любом, незначительном нарушении в поставках это не отразилось на непрерывном производстве бетонных смесей. Рекомендуется заполнять склады заполнителей заранее, до начала производства.

Цементы, наполнители и добавки: нет особых требований к хранению (такие же, как и для обычного тяжелого бетона). Всегда необходимо следовать рекомендации производителя по хранению материалов. Рекомендуется заранее по-

полнять запасы мелкодисперсных компонентов, чтобы избежать изменения состава при последующих партиях.

### **7.3 Оборудование для перемешивания и пробные замесы**

Высокопрочный легкий бетон может быть приготовлен в любом бетономесителе, в том числе в лопастных смесителях периодического действия, но предпочтительнее использовать смесители непрерывного действия. Тем не менее, при производстве КЛБ особенно важно, чтобы смеситель был в хорошем состоянии и мог обеспечить полное и равномерное смешивание твердых материалов с достаточным усилием сдвига для диспергирования и активации суперпластификатора.

Время, необходимое для достижения полного перемешивания КЛБ может быть немного больше, чем для обычного бетона за счет снижения сил трения и достижения полной активации суперпластификатора. Важно проводить предварительные испытания, чтобы установить эффективность отдельных смесителей и оптимальную последовательность при добавлении компонентов. Объем бетона для предварительных испытаний должен быть не меньше, чем половина мощности смесителя.

Перед началом поставок бетонных смесей рекомендуется произвести испытание завода для того, чтобы в полном масштабе производства проверить, отвечает ли бетонная смесь и затвердевший бетон предъявляемым к ним требованиям.

### **7.4 Процедура приготовления бетонной смеси в заводских условиях**

Приготовление легких бетонов включает следующие процессы: складирование и при необходимости дробление и сортировку пористых заполнителей; дозировку составляющих легкого бетона и загрузку их в смеситель; смешивание легкого бетонной смеси и выгрузку готовой смеси на транспортные средства; доставку и загрузку бетонной смеси в формы; уплотнение бетонной смеси; твердение бетона (в естественных условиях или с термообработкой) - извлечение изделий из форм.

Дозирование материалов при приготовлении легкогобетонной смеси независимо от того, на какой установке и где приготавливается бетон, должно производиться с точностью: цемента и тонкомолотых добавок  $\pm 1\%$  по весу; заполнителей  $\pm 3\%$  по объему; воды  $\pm 1\%$  по весу или объему.

При назначении дозировки воды следует учитывать влажность заполнителей и вносить соответствующую поправку. В случае применения весовых дозаторов материалы дозируются по весу с учетом насыпного веса и влажности, которые проверяются не реже 2 раз в смену. Следует проявлять осторожность, т.к. вследствие высокой степени водопоглощения пористого заполнителя, может произойти его насыщение до дозирования и перемешивания. При несоответствии влажности или степени водонасыщения заполнителей, некоторое количество воды затворения может поглощаться пористыми заполнителями в процессе перемешивания, тем самым создавая кажущуюся высокую водопотребность или быструю потерю осадки конуса во время транспортировки и укладки бетонной смеси.

Очередность загрузки материалов в барабан смесителя, последовательность и продолжительность их перемешивания зависят от состояния пористого заполнителя (влажный или сухой). Перемешивание бетонных смесей на пористых заполнителях, как правило, должно быть интенсивным для достижения однородности смесей и производиться в мешалках принудительного действия, не дробящих и не истирающих заполнители, т. е. не нарушающих принятый зерновой состав смеси. Для перемешивания легких бетонов с крупными заполнителями определенного зернового состава применение бегунов недопустимо вследствие измельчения крупного заполнителя, что нарушает оптимальный зерновой состав смеси.

Заполнители для легкого бетона, приготовляемого в зимних условиях, должны иметь при загрузке в мешалку положительную температуру, но не более  $+50^{\circ}\text{C}$ , а вода для затворения — не ниже  $+15^{\circ}\text{C}$ , но не более  $+70^{\circ}\text{C}$ . Температура смеси на выходе из мешалки должна быть не ниже  $+10^{\circ}\text{C}$ .

Стандартная процедура перемешивания принимается после проведения пробных замесов на заводе-изготовителе и ее необходимо придерживаться для уменьшения разницы в качестве бетонной смеси в различных партиях.

Добавки не должны добавляться непосредственно в сухие составляющие бетонной смеси. Их необходимо добавлять вместе с водой затворения. Также различные типа добавок не должны смешиваться вместе до дозирования, если это специально не оговорено производителем. Это также относится и к возможности смешивания различных добавок в дозаторе. Если используются воздухововлекающие добавки, то лучше всего их добавлять перед суперпластификатором и в то время, когда бетон еще имеет жидкую консистенцию.

В связи с мощным эффектом современных суперпластификаторов важно, чтобы дозаторы проходили регулярную поверку и оборудование имело высокую точность дозирования.

В процессе производства, может быть множество факторов, которые индивидуально или коллективно изменяют однородность смеси. Основными факторами являются изменение количества свободной влаги, распределение частиц в объеме бетона и изменение последовательности дозирования. Также, изменение свойств можно наблюдать, когда вводят в состав компоненты из других партий.

#### **7.4.1 Автобетоносмесители**

Данная практика, как правило, не подходит для больших объемов бетона, обычно необходимых для проектов гражданского строительства, потому что эффективность перемешивания изменяется в зависимости от типа машины-смесителя, поэтому становится труднее контролировать качество бетонной смеси, чем для стационарных заводов изготовителей. Автобетоносмесителю, скорее всего, потребуется дополнительное время перемешивания, так как они менее эффективны, чем заводские смесители.

Принципы загрузки в автобетоносмеситель аналогичны, как и для стационарных смесителей. Вследствие меньшей плотности пористых заполнителей, большее количества КЛБ, нежели бетона нормальной плотности можно транспортировать в автобетоносмесителе без превышения веса или лимитированной



нагрузки на ось автомобиля. Тем не менее, объем КЛБ в барабане не должен превышать номинальную мощность барабана или не более 63% от объема барабана при использовании его в качестве смесителя в соответствии с ASTM C 94 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.

#### **7.4.2 Смесители непрерывного действия**

Пористые заполнители обычно добавляют в смеситель первыми, затем мелкий заполнитель, после сразу добавляют основное количество воды затворения, вяжущие материалы и химические добавки. Каждый вид химической добавки дозируют отдельно и вводят с водой затворения. При использовании оба вида заполнителей (плотного и пористого) они вводятся одновременно, однако предпочтительней, при возможности сначала вводить плотные заполнители, а затем пористые. При использовании мелкого пористого заполнителя, его обычно всыпают после крупного заполнителя (пористого и плотного).

Интенсивное перемешивание смесителем непрерывного действия повышает технологичность смеси и дает возможность, уменьшить количество добавляемого суперпластификатора по сравнению со смесителем принудительного действия.

Вследствие значительных различий в видах смесителей, точная методология загрузки смесителя определяется опытным путем до начала производства.

### **8. Контроль производства**

#### **8.1 Компоненты бетонной смеси**

Легкий бетон более чувствителен, чем обычный бетон к изменениям физических свойств его составляющих, особенно к изменениям влажности заполнителей и формы их зерен, так что необходимо производить более тщательно и часто входной и пооперационный контроли.

Рекомендуется производить проверку качества заполнителей каждый день производства до начала дозирования. Визуальную проверку необходимо производить для каждой партии заполнителя, чтобы, в случае заметного изменения, отклонить доставку материала. Следует постоянно контролировать содержание

влаги в заполнителях и корректировать состав смеси с учетом полученных данных.

При поставке новых партий цемента, заполнителей или добавки, проводятся дополнительные мероприятия по контролю их свойств, чтобы определить любые существенные изменения и взаимодействие между составляющими компонентами бетона.

## **8.2 Производство**

Производство и доставка КЛБ осуществляются под ответственность производителя, а в случае производства товарного бетона, его качество должно отвечать договорным соглашениям между заказчиком и производителем и требованиям EN 206-1:2000, пункт 9.

Область применения легкого бетона будет определять указанные характеристики по плотности и классы по прочности бетона. Производственный контроль должен гарантировать тщательное соблюдение требований при производстве и любое отклонение от нормы должно быть немедленно доведено до сведения оператора БСУ и технического менеджера.

Для того, чтобы обеспечить соответствие свойств бетона, производителю рекомендуется тестировать каждую партию по технологическим свойствам бетонных смесей и физико-механическим свойствам бетона. Впоследствии, каждая партия должна визуально проверяться перед транспортировкой на строительную площадку. Особое внимание необходимо уделять заполнителям, при получении новой партии. Например, корректировка содержания воды может быть необходима, чтобы компенсировать изменение влажности в заполнителях.

## **9. Доставка бетонной смеси**

### **9.1 Транспортировка и доставка**

Необходимым условием гарантирования качества бетонных смесей и бетонов является сбалансированная производственная мощность бетонного завода, время в пути и возможность укладки бетонной смеси на строительной площадке, чтобы рабочие на строительной площадке могли заливать бетон без перерыва в

поставках и в течение хранения удобоукладываемости бетонной смеси. Остановка производства может привести к тиксотропному гелеобразованию в бетоне, что влияет на его способность к заполнению формы.

## **9.2 Прием бетона на строительной площадке**

При производстве товарного бетона важно, чтобы была документально согласована стандартная процедура для приемки бетона на месте. Производителю и заказчику необходимо согласовать эту процедуру в контракте. Она должна включать в себя визуальный осмотр каждой партии бетона и проведение определенных тестов для определения параметров соответствия.

Производитель проводит тестирование свойств бетона согласно EN 206-1 для определения консистенции, прочности и других свойств. Это называется «соответствие испытаниям». Отбор проб осуществляется в соответствии с EN 12350-1.

Кроме того, заказчик может производить дополнительное тестирование, в этом случае оно называется «тестирование на идентичность».

Проверяющая сторона должна гарантировать, что все испытания на идентичность свойств осуществляются компетентным, обученным персоналом в условиях, отвечающих требованиям для проведения испытаний. Испытания должны проводиться на сертифицированном специализированном оборудовании, отвечающим технологическим требованиям для испытания. Оборудование должно постоянно проходить поверку на точность измерений.

В документации об испытаниях необходимо включать информацию об ответственности за проведение тестирования, а также порядок выполняемых действий.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б****УТВЕРЖДАЮ:****Директор ООО «Архионика»****Андрюхина А.И.****«08» января 2016 г.****АКТ**

внедрения результатов исследования, выполненных коллективом научных сотрудников  
Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по результатам  
диссертационной работы ассистента кафедры технологий строительных конструкций,  
изделий и материалов Лахтарыны С.В.

**Состав комиссии:**

Председатель:	<b>Андрюхина А.И.</b> – директор ООО «Архионика»
Члены комиссии:	<b>Дацишин О.В.</b> – главный архитектор ООО «Архионика» <b>Зайченко Н.М.</b> – научный руководитель, д.т.н., проф., заведующий кафедрой ТСКИиМ ДонНАСА <b>Мартынова В.Б.</b> – к.т.н., доцент кафедры АПГЗ ДонНАСА <b>Лахтарына С.В.</b> – ассистент кафедры ТСКИиМ ДонНАСА

В период с 27.01.2016 г. до 25.02.2016 г. разработано конструктивное решение несущей монолитной наружной стены жилого дома. Расчетная схема представляет собой систему стержневых элементов с двумя монолитными наружными и внутренней стенами. Расстояние между стенами 6,0 м.

Приведен сравнительный анализ вариантов конструктивных решений наружной стены и перекрытия. В первом варианте (I) принят несущий слой – монолитный тяжелый бетон. Толщина монолитного слоя 250 мм. Основные физико-механические свойства тяжелого бетона: средняя плотность  $\rho_0=2530 \text{ кг/м}^3$ ; класс В20; коэффициент теплопроводности  $\lambda=2,04 \text{ Вт/(м·К)}$ , во втором варианте (II) принят несущий слой – монолитный легкий бетон. Толщина монолитного слоя 150 мм. Основные физико-механические свойства тяжелого бетона: средняя плотность  $\rho_0=1800 \text{ кг/м}^3$ ; класс В40; предел прочности при сжатии в возрасте двадцать восемь суток нормального твердения, ( $R_{сж}=55,5 \text{ МПа}$ ); модуль упругости,  $E_b=33,3 \text{ ГПа}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda=0,80 \text{ Вт/(м·К)}$ . Для обоих вариантов в качестве утеплителя приняты плиты негорючие теплоизоляционные базальто-волоконистые толщиной 0,175 м; отделочный слой – цементно-песчаная штукатурка толщиной 0,050 м. Расчетная конструктивная схема наружной стены и перекрытия представлена на рис. 1.

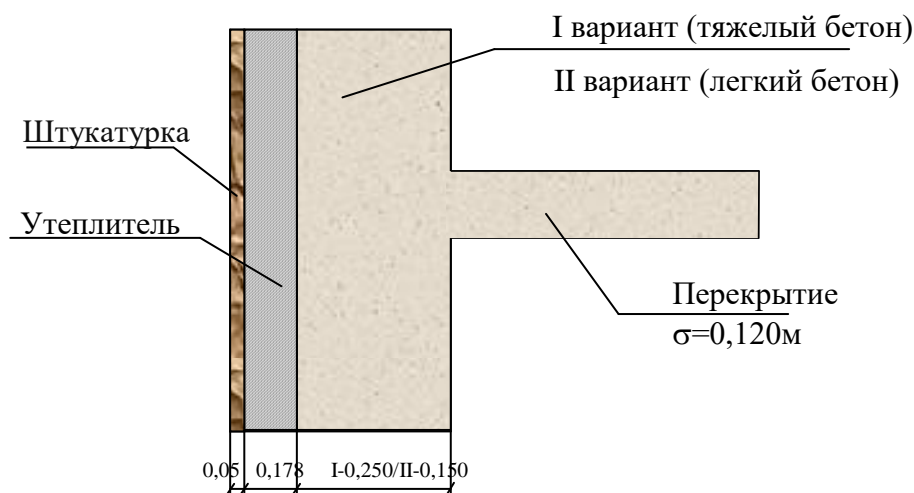


Рис. 1. Расчетная конструктивная схема наружной стены и перекрытия.

С помощью программы «Structure CAD® 11.5» выполнен статический расчет для жилого дома типовой серии 87. Расчетная схема представляет собой систему стержневых элементов с двумя наружными и внутренней стенами. Расстояние между стенами 6,0 м. Рассматриваем участок секции шириной 1,0 м. Вертикальные стержни моделируют работу наружных стен и имеют размеры расчетных сечений 1000x250 мм и 1000x150 мм для двух вариантов. Общий вид расчетной схемы приведен на рис. 2. В результате статического расчета получены внутренние усилия. Для каждого варианта принято минимально допустимое армирование в соот-

ветствии с конструктивными требованиями, предъявляемыми к железобетонным внецентренно нагруженным элементам.

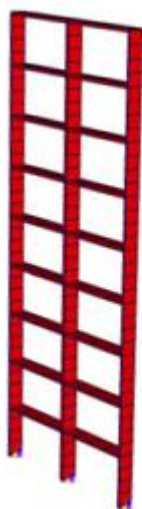


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы.

По внутренним усилиям определены уровни напряжения с учетом принятого армирования. Согласно статическому расчету, конструктивным требованиям ДБН В.2.6-98:2009, СП 63.13330.2012 и требованиям пожаробезопасности БНВ.11-7-2002 принята несущая наружная стена из легкого бетона толщиной 0,150 м. максимальное возможное количество этажей не должно превышать девяти.

Приведенное сопротивление теплопередачи рассчитывалось для каждого варианта с помощью численного моделирования температурных полей с использованием программы THERM 7.0. Данный метод сечений позволяет учитывать в полной мере влияние всех теплопроводных включений и дополнительных теплопотерь через участки конструкции, а также отражает трансмиссионные потери теплоты через наружную стену.

Алгоритм расчета приведенного сопротивления теплопередаче заключается в следующем.

1. Устанавливаются геометрические размеры конструкции (выделяются участки по внутреннему обмеру размером 1 м).
  2. Устанавливаются значения теплопроводности каждого конструктивного слоя.
  3. Назначаются расчетные значения температур (внутренняя  $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$ , наружная  $t_{н} = -22^{\circ}\text{C}$ ) и коэффициентов теплоотдачи поверхностей. На сечениях конструктивных слоев условия считаются адиабатическими.
  4. По программе Therm 7.0 определяется значение теплового потока  $U$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- Результаты расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 1.

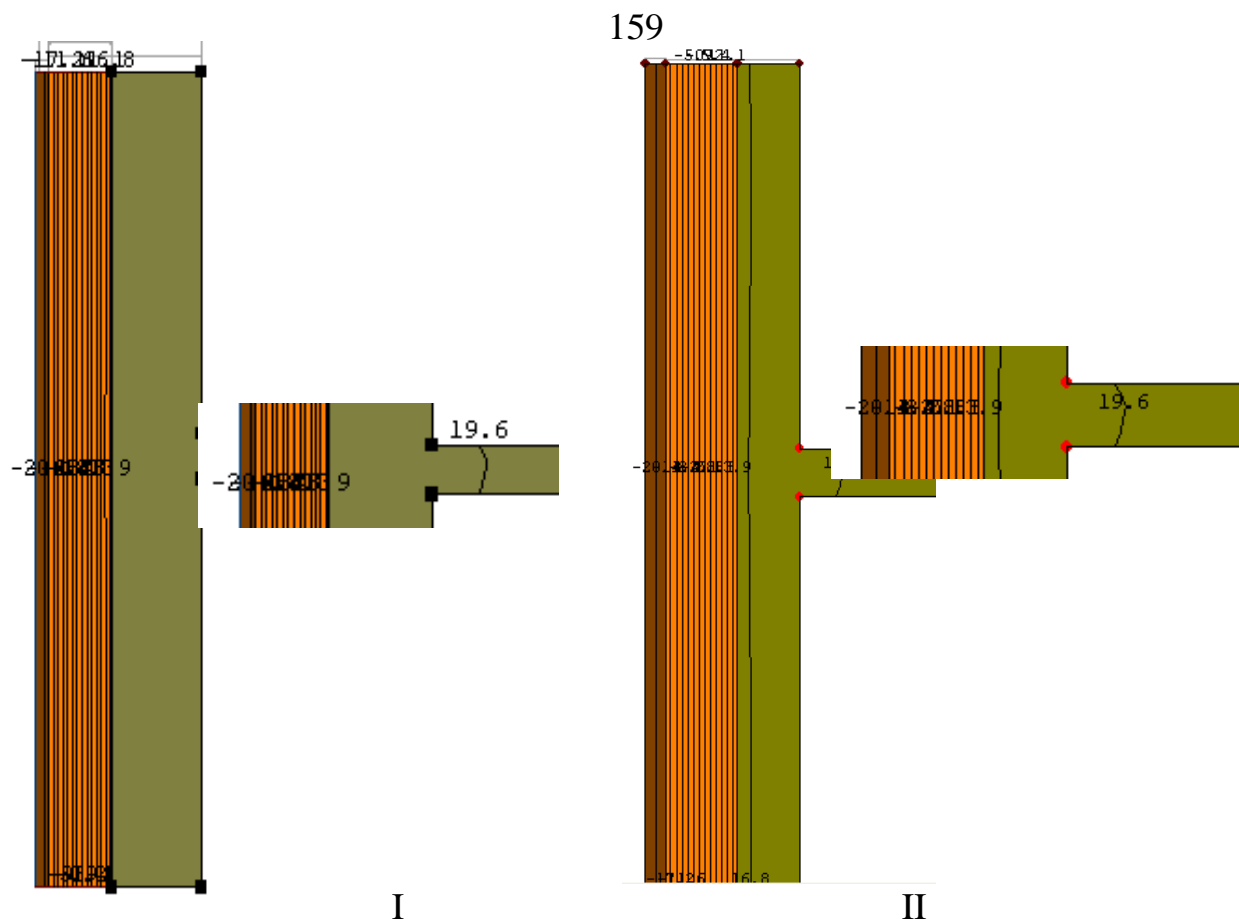


Рис.3. Распределение плотности теплового потока по сечению наружной стены и перекрытия: I – наружная стена с несущим слоем из монолитного тяжелого бетона, II– наружная стена с несущим слоем из монолитного легкого бетона.

Таблица 1

Приведенные сопротивления теплопередачи наружной стены жилого дома

Вид конструкции наружной стены	Нормативное сопротивление теплопередачи, $R_{qmin}, m^2 \cdot K / Вт$	Тепловой поток $U, Вт / (m^2 \cdot K)$	Коэффициент термической однородности, $\gamma$	Сопротивление теплопередачи, $m^2 \cdot K / Вт$	
				по основному полю, $R_{\Sigma}$	приведенное, $R_{\Sigma пр}$
Монолитный несущий слой из тяжелого бетона	3,3	0,29	1,02	3,39	3,45
Монолитный несущий слой из легкого бетона	3,3	0,29	1,01	3,40	3,45

Приведенные на рис. 3 температурные поля свидетельствуют о преимуществе утепления с внешней стороны, когда линии равных температур расположены параллельно поверхностям стены. Анализ полученных результатов согласно расчету показывает, что значительные

стоки теплоты не наблюдаются по неоднородности конструкции, что связано с оптимальным подбором толщины утеплителя для двух вариантов конструкции.

Приведенное термическое сопротивление теплопередаче составляет: для I варианта  $R_{\Sigma пр} = 3,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  при толщине наружной стены 0,475 м, и для II варианта  $R_{\Sigma пр} = 3,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  при толщине наружной стены 0,375 м, что отвечает современным требованиям СНиП 2.01.07-85\*, ДБН В.2.6-31:2006. Коэффициент термической однородности для I варианта составляет  $r = 1,02$  и для II варианта  $r = 1,01$ , что соответствует требованиям, в которых рекомендуется принимать коэффициент термической однородности не менее 0,7. При этом характер распределения теплового потока одинаков. Температура поверхности несущего слоя стены в местах сопряжения с монолитной плитой перекрытия, внутри помещения составляет  $19,6^\circ\text{C}$  для I и II вариантов. При этом температурный перепад между температурой воздуха внутри помещения и приведенной температурой внутренней поверхности конструкции наружной стены,  $\Delta t_{пр}, ^\circ\text{C}$ , составляет  $2,4^\circ\text{C}$ , что не превышает допустимого значения  $\Delta t_{сг}, ^\circ\text{C} = 4^\circ\text{C}$ , согласно, СНиП 2.01.07-85\*, ДБН В.2.6-31:2006, а значит обеспечивает энергоэффективность и, соответственно, внутренний климатический комфорт помещений жилого монолитно дома. Кроме того, толщина наружной несущей монолитной стены из легкого бетона снизилась на 21% по сравнению со бетонной стеной при обеспечении энергоэффективности здания.

Для экономической эффективности приведен сравнительный анализ по двум вариантам конструктивного решения наружной стены и перекрытия жилого дома. Техно-экономические показатели определены с помощью компьютерной программы «Тендер».

#### Представители ДонНАСА

Заведующий кафедрой ТСКИиМ

д.т.н., проф.

Зайченко Н.М.

к.т.н., доцент кафедры АПГЗ

Мартынова В.Б.

Ассистент кафедры ТСКИиМ

Лахтарина С.В.

#### Представители ООО «Архионика»

Директор

Андрюхина А.И.

Главный архитектор

Дацишин О.В.



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»

#### УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
Донбасской национальной  
академии строительства и  
архитектуры, д.т.н., профессор

Музанов В.Ф.  
«08» 01 2016 г.

#### ПРОТОКОЛ

заседания рабочей группы по рассмотрению результатов диссертационного исследования аспиранта Донбасской национальной академии строительства и архитектуры Лахтарины С.В. "Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества" для обоснования внедрения в практику проектирования

Рабочей группой специалистов кафедр "Автомобильные дороги и аэродромы", "Технологии строительных конструкций, изделий и материалов" в составе – д.т.н., профессора Братчуна В.И, д.т.н., профессора Зайченко Н.М., к.т.н., доцента Бородая Д.И., аспиранта Лахтарины С.В., рассмотрены основные результаты диссертационного исследования аспиранта Лахтарины С.В. "Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества".

#### Комиссией отмечено:

1. Действующие нормативные документы ДБН В.2.3-14:2006 "Мости та труби. Правила проектування", СП 35.13330.2011 "СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы" предусматривают использование в конструкциях мостов тяжелого конструкционного бетона с плотностью 2200 – 2500 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 26633. Применение бетонов с другими признаками и плотностью допускается в опытных конструкциях.
2. Рекомендации зарубежных норм EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: "Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings", EN 1992-2:2007 Eurocode 2 "Design of concrete structures. Part 2. Concrete bridges. Design and detailing rules", а также мировой опыт проектирования и строительства

элементов автодорожных мостов из легкого высокопрочного бетона свидетельствует о высокой эффективности конструктивных решений.

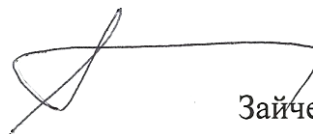
3. Исследованием технико-экономической эффективности применения легких высокопрочных бетонов при реконструкции автодорожного моста, обоснованно определена оптимальная область расчетных параметров железобетонной плиты проезжей части с использованием легкого высокопрочного бетона при проектировании элементов железобетонных автодорожных мостов по нормам "Eurocode".
4. Результаты исследования, изложенные в диссертационной работе С.В. Лахтарины, могут быть рекомендованы в опытных конструкциях проектов строительства, ремонта и реконструкции автодорожных мостов.

Заведующий кафедрой  
автомобильных дорог и аэродромов  
ГОУ ВПО "Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры",  
доктор технических наук, профессор



Братчун В.И.

Заведующий кафедрой  
технологий строительных конструкций,  
изделий и материалов  
ГОУ ВПО "Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры",  
доктор технических наук, профессор



Зайченко Н.М.

К.т.н., доцент кафедры  
автомобильных дорог и аэродромов  
ГОУ ВПО "Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры"



Бородай Д.И.

Научный сотрудник, аспирант кафедры  
технологий строительных конструкций,  
изделий и материалов  
ГОУ ВПО "Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры"



Лахтарина С.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



**Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики**

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»**

86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, тел.: (062) 340-15-80,  
(0623) 22-24-67, факс (0623) 22-77-19, email: mailbox@donnasa.ru, идент. код 02070795

от 08.04.16 № 34/04  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.006.02 при  
Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Лахтарины Сергея Викторовича на тему "Легкие высокопрочные бетоны с  
повышенным коэффициентом конструктивного качества", представленную  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Комиссия в составе: проректора по научно-педагогической и воспитательной работе, к.т.н., профессора Левченко В.Н., директора строительного института, д.э.н., профессора Севки В.Г., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01 (08.04.01) "Строительство" профиль "Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций" используются теоретические и экспериментальные данные по кандидатской диссертационной работе Лахтарины Сергея Викторовича "Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества" в дисциплинах "Бетоны и строительные растворы", "Технологии бетонных и железобетонных изделий и конструкций" и "Модифицированные цементные бетоны нового поколения со специальными свойствами".

Члены комиссии:

Проректор по научно-педагогической  
и воспитательной работе,  
к.т.н., профессор

Директор строительного института  
д.э.н., профессор

Начальник учебного отдела,  
к.э.н., доцент



В.Н. Левченко

В.Г. Севка

А.А. Сухина