

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Технология строительного производства

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка бетонов с заданными характеристиками на основе
расширяющих добавок

Студент

А. Ш. Джафарли

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент В.Н. Шишканова

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	3
1 Бетоны на основе расширяющих добавок	5
1.1 Механизм усадки.....	5
1.2 Расширяющие добавки	9
1.3 Факторы, влияющие на трещинообразование в бетоне	12
1.4 Применение бетонов на основе расширяющих добавок в строительстве	21
2 Характеристики используемых материалов и методы исследований	29
2.1 Методы исследований	29
2.2 Характеристики используемых материалов.....	35
3 Исследование свойств бетона на основе расширяющих добавок.....	51
3.1 Влияние расширяющих добавок на физико-механические свойства бетона	51
3.2. Влияние пластификатора на физико-механические свойства бетонов на основе расширяющих добавок.....	57
Заключение	65
Список используемых источников.....	66

Введение

На сегодняшний день бетон является достаточно распространенным материалом в строительстве жилых, промышленных, гидротехнических, санитарно-технических и многих других сооружений в самых различных условиях эксплуатации. Такую популярность бетон получил благодаря своим свойствам и характеристикам, которые можно регулировать в зависимости от того, что именно требуется построить. Бетон считается универсальным материалом с высокими показателями прочности и долговечности. Бетон достаточно прост в приготовлении, но требует благоприятных условий (влажность, температура среды и прочее) при твердении, так как формирование свойств бетона происходит именно в процессе твердения.

Актуальность работы. Обеспечение долговечности зданий и сооружений имеет большое значение во всём мире. Поэтому для повышения эксплуатационных характеристик бетона на данный момент часто используют минеральные добавки, самые популярные из которых – расширяющие. Данные добавки повышают физико-механические свойства бетона, а также увеличивают срок службы конструкции. Предотвращение негативных последствий деформаций от усадки входит в число наисложнейших проблем в технологии бетона. Расширяющие добавки как раз помогают снизить величину усадки. Поэтому способы улучшения свойств бетона с помощью расширяющих добавок являются актуальной задачей в настоящее время.

Целью работы является оптимизация состава расширяющих добавок для получения бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками и оценка физико-механических свойств таких бетонов.

Предметом исследования диссертационной работы являются способы и методы повышения физико-механических свойств бетонов с помощью расширяющих добавок.

Объектом исследования диссертационной работы являются бетоны на

основе расширяющих добавок.

Задачи исследования:

1. Обзор научно-технической литературы по составу, свойствам и применению вяжущего и заполнителей;
2. Изучение свойств вяжущих и заполнителей;
3. Анализ расширяющих добавок и подбор оптимального состава РД для получения бетонов с высокими физико-механическими свойствами;
4. Исследование влияния пластифицирующих добавок на свойства бетонов на основе расширяющих добавок.

Методы исследования: анализ и эксперимент.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

1. Данные о влиянии расширяющих добавок на физико-механические свойства бетонов.
2. Данные о совместимости разных видов добавок в бетоне.

Практическая значимость состоит в эффективности выбора видов добавок для повышения физико-механических свойств бетона.

Апробация результатов работы. В ходе написания диссертации было опубликовано 2 статьи:

1. Шишканова В.Н., Джафарли А.Ш. Процессы трещинообразования и повышение долговечности конструкций [Электронный ресурс] / В.Н. Шишканова, А.Ш. Джафарли // Международная научно – практическая конференция «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2019. – URL: http://mnic-penza.ru/inform/conf/sb_mk-44-19-2.pdf.

2. Шишканова В.Н., Джафарли А.Ш. Эффективность применения расширяющих добавок для бетонных конструкций / В.Н. Шишканова, А.Ш. Джафарли // IX Международная научно – практическая конференция «Организационно – экономические и инновационно – технологические проблемы модернизации экономики России». – 2020.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка.

1 Бетоны на основе расширяющих добавок

1.1 Механизм усадки

Предотвращение негативных последствий деформаций бетона от усадки входит в число наисложнейших проблем в технологии бетона. Бетон деформативен, это значит, что объемные и линейные габариты бетонных конструкций поддаются изменениям под воздействием определенных факторов (внешняя среда, механические нагрузки и др.). Но самым серьезным фактором являются физико-механические процессы, которые протекают внутри бетона, и в последствии которых возникают собственные деформации.

Внутрискруктурные напряжения и собственные деформации являются одной из самых важных причин недостаточной долговечности бетона, а значит железобетона тоже. Это все приводит к появлению макро- и микротрещин в бетоне. Самыми опасными деформациями считаются деформации от усадки. Усадка определяет появление дефектов в твердеющем бетоне и способствует возникновению первоначальных дефектов после твердения. Во время эксплуатации в данном бетоне при изменениях показателей температуры и влажности среды образуется дополнительное напряжение, которое суммируется с внутрискруктурным напряжением и приводит к деформациям. Это сопровождается появлениями трещин, которые со временем разрушает целостную структуру бетона.

Усадочные деформации в сочетании с низкой прочностью бетона на растяжение приводят к появлению трещин и в железобетонных конструкциях, особенно в поверхностном слое, повышают их деформативность, снижают долговечность. Одной из наиболее сложных проблем в технологии бетона является проблема предотвращения отрицательных последствий усадочных деформаций бетона в строительных конструкциях. Это означает, что линейные и объемные размеры бетонных

конструкций могут изменяться под влиянием некоторых факторов, таких, например, как воздействие внешней среды или внешние механические нагрузки.

Усадочные процессы представлены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Усадочные процессы

Коэффициент усадки представляет собой условное процентное отношение изменения начального объема материала в сравнении с его конечным значением, и обычно не превышает 1,5%.

Собственные деформации связаны, в первую очередь, с тем, что между бетоном и окружающей средой непрерывно идет влагообмен. Значительные усадочные деформации могут привести к существенным повреждениям строительных конструкций.

«Главными причинами усадочных деформаций бетона являются химические и физические процессы, происходящие при взаимодействии цемента с водой. Во-первых, в результате такого взаимодействия при

твердении цементного камня изменяется его влажность. Это может стать причиной влажностной усадки бетона. Во-вторых, твердение бетона сопровождается контракционной усадкой. Контракция является следствием химического взаимодействия минералов цемента с водой и объясняется уплотнением химически связанной воды. Еще одной причиной уменьшения объема цементного камня и бетона является карбонизация. Карбонизационная усадка происходит в результате соединения свободной извести с углекислотой, находящейся в атмосфере. Таким образом, сложные физико-химические процессы, лежащие в основе явления усадочных деформаций бетона, имеют влажностную, контракционную и карбонизационную составляющие.» [44].

«Одним из важных факторов, способствующих усадочной деформации бетона, является испарение влаги. Испарение влаги из объема цементного камня начинается, в первую очередь, из крупных пор и капилляров и происходит за счет нарушения физико-химических связей и удаления так называемой свободной воды. После испарения воды из крупных пор и капилляров начинается испарение из микропор и мелких капилляров. Резко увеличиваются силы капиллярного сжатия, и цементный камень подвергается деформации сжатия. Усадку, возникающую вследствие этого процесса, называют капиллярной.» [44].

«После удаления капиллярной воды начинается удаление структурно связанной и адсорбированной воды. Вначале удаляется вода структурных ячеек, образованных мельчайшими кристаллами продуктов гидратации цемента (субмикрочастицами геля) и полимолекулярно адсорбированных слоев. Затем, в завершение процесса испарения влаги, удаляется вода, адсорбированная в виде мономолекулярных слоев. Дальнейшее обезвоживание цементного камня возможно только в сушильном шкафу, где удаляется вода, адсорбированная в щелях молекулярных размеров, образующихся в местах сцепления субмикрочастиц геля. Удаление структурно связанной и адсорбированной воды сопровождается

значительным сжатием цементного камня. Усадку, происходящую при этом процессе, называют адсорбционной. Капиллярная и адсорбционная составляющие усадки бетона образуют в сумме так называемую влажностную усадку.» [44].

«Контракционная составляющая усадки бетона имеет физико-химический характер и связана с уменьшением объема системы «цемент - вода» при возникновении в процессе схватывания и начального периода твердения бетона новообразований, имеющих объем меньший, чем объем исходных продуктов. Контракционный эффект также связан с физико-химическим процессом адсорбции воды поверхностью цементных зерен и кристаллов новообразований. В ходе адсорбции происходит уплотнение воды в тонких адсорбционных слоях, а, следовательно, и сжатие системы.» [44].

Карбонизационная усадка происходит в результате соединения свободной извести с углекислотой, находящейся в атмосфере. После испарения воды из крупных пор и капилляров начинается испарение из микропор и мелких капилляров. Затем, в завершение процесса испарения влаги, удаляется вода, адсорбированная в виде мономолекулярных слоев.

В целях уменьшения негативных последствий собственных деформаций с помощью их регулирования были проработаны бетоны с компенсированной усадкой, основой которых являются напрягающие цементы и расширяющие добавки.

В качестве сырья для получения расширяющих добавок особый интерес представляет утилизация крупнотоннажных отходов, которая позволяет решать проблемы охраны окружающей среды и ресурсосбережения в строительстве. Эти добавки вводят в мельницу, когда готовится цемент, или в бетоносмеситель, когда готовится бетонная смесь.

Введение расширяющей добавки в процессе приготовления бетонной смеси регулирует энергию расширения вяжущего, что позволяет получать

бетон для сборного и монолитного строительства, как с компенсированной усадкой, так и напрягающие с различной энергией самоупрочения, обеспечивая высокое качество изделий.

1.2 Расширяющие добавки

Создание современных высококачественных строительных материалов, которые позволяют обеспечивать долговечность конструкций, является основной задачей строительства нашего времени. На данный момент строительная отрасль богата множеством разнообразных строительных сооружений, но различные климатические условия их возведения и эксплуатации требуют разработки специальных вяжущих и в дальнейшем бетонов на их основе.

За последние десятилетия были созданы и внедрены в различные отрасли строительства, следующие виды бетонов: с компенсированной усадкой и напрягающие. Конструкции на основе данных бетонов имеют более высокие показатели морозостойкости, водопроницаемости и трещиностойкости. Основой этих бетонов является портландцемент и расширяющие добавки.

Расширяющийся бетон представляет собой материал, который содержит напрягающий цемент или же расширяющие добавки, которые задают предварительное напряжение конструкций во время твердения.

Вяжущие компоненты – портландцемент или гипс, после затворения водой раствор постепенно преобразуется в прочный, ударостойкий и долговечный цементный или гипсовый камень.

Компоненты, из которых обычно состоит бетон на основе расширяющих добавок:

Минеральные наполнители – промытый кварцевый песок, керамзитовый гравий, зола уноса и др. Этот компонент уменьшает усадку цементного раствора.

Расширяющие добавки (РД) – это добавки, которые применяются для расширения цементного раствора. Вводят РД при приготовлении раствора или бетона. С помощью РД можно регулировать свойства раствора или бетона. Можно получить много видов расширяющего цемента, регулируя количество вводимого РД. Но необходимо соблюдать правильные пропорции, чтобы избежать негативного влияния расширения на прочностные характеристики цементного камня.

США и Япония являются наиболее крупными производителями расширяющих добавок. Например, компания «Денка» является одной из самых крупных предприятий, занимающихся производством РД. Данная компания базируется в городе Токио, но имеет множество представительств и в других крупных городах мира.

В России также были выпущены партии РД, предназначенные для опытных целей. Эмпирическим путём были разработаны новые модификации РД. Но требуется более серьёзный подход для достижения производственных масштабов ведущих стран.

Для производства РД можно использовать как различные отходы заводов и предприятий, так и природные материалы. В России и первого и второго огромное множество. Создание предприятий, направленных на производство РД, помогло бы стране с решением экономических и экологических задач.

Отходы горной, металлургической, топливно-энергетической отраслей являются самыми ценными сырьевыми материалами. Также можно использовать природные материалы, которыми богата наша страна (алуниты, туфы и пр.).

Расширяющие добавки дают возможность создания новых видов бетонов с преднапряжением, которые могут применяться при монолитном и сборном строительстве. Срок службы сооружений и конструкций может увеличиться в 1,5-2 раза, так как будет соблюдаться высокое качество бетона.

Речь идёт о таких свойствах бетона, как морозостойкость, трещиностойкость и водонепроницаемость.

Благодаря организации производства РД решится ряд технико-экономических задач по использованию бетона. Например, можно получить бетон с заданной активностью напряжения на месте стройки. Возможность получения таких бетонов позволит экономить и на транспортных затратах, так как для необходимого эффекта расширяющих добавок потребуется примерно в 10 раз меньше, чем потребовалось бы напрягающего цемента.

Если проанализировать данные, представленные в мировой литературе, можно прийти к выводу, что все расширяющие добавки, выпускаемые и изучаемые на данный момент, делятся на три типа.

На рисунке 1.2 представлены типы расширяющих добавок.

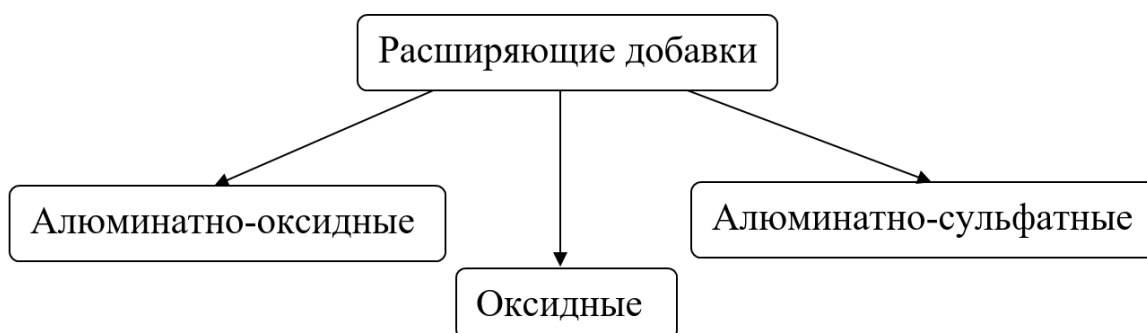


Рисунок 1.2 – Типы расширяющих добавок

Добавки алюминатно-сульфатного типа считаются самым распространенными, соответственно, они изучены лучше, чем остальные типы добавок. В качестве алюминатной составляющей могут быть использованы материалы, которые содержат CA_2 , CA_3 , $C_{12}A_7$, C_4A_3S и так далее, а сульфатсодержащим компонентом могут выступать – гипс, полугидрат сульфат кальция и пр. В данном случае расширение бетонной смеси происходит благодаря образованию этtringита.

Добавки алюминатно-оксидного типа содержат свободный оксид кальция ($\text{CaO}_{\text{св.}}$) наряду с сульфато- и алюмосодержащими компонентами. У добавок данного типа расширение происходит не только за счёт образования этtringита, но и частично за счёт гидратации оксида кальция.

Положительное воздействие расширяющих добавок на физико-механические свойства бетона показывают, что развитие производств, выпускающих расширяющие добавки – целесообразно. Есть большой перечень сырья, пригодного для производства расширяющих добавок, но должны быть выбраны самые доступные и экономически выгодные материалы. Как говорилось выше, изготовить расширяющие добавки можно из многотоннажных отходов различных производств (металлургических, горных и т.д.). Свойства расширяющих добавок можно регулировать и варьировать с помощью изменения состава компонентов, из которых состоит РД.

Расширяющие добавки модифицируют портландцемент в расширяющее вяжущее. Благодаря этому получают бетоны с компенсированной усадкой и другими требуемыми свойствами.

Известно, что основой специфики твердения РД в среде портландцемента является образование этtringита (ГСАК) в начальный период твердения (первые 3-7 суток). Есть мнение, что гидросиликаты кальция имеют отрицательный заряд, что и определяет их усадку, а гидроалюминаты кальция, ГСАК трехсульфатной формы, гидроксид кальция и гипс заряжены положительно, что и обуславливает их расширение. Тем не менее, механизм расширения цементного камня пока не получил однозначного объяснения и до сих пор является предметом дискуссий.

1.3 Факторы, влияющие на трещинообразование в бетоне

Говоря о трещиностойкости бетонов, мы описываем довольно большой круг вопросов. Дело в том, что на образование трещин в бетоне влияет

несколько факторов и в зависимости от целей исследования трещиностойкость рассматривается с позиции одного из них. Если же мы ставим задачу повышения трещиностойкости вообще, то необходимо рассматривать ее с позиции каждого фактора и найти такое их сочетание, при котором трещиностойкость будет максимальной.

Бетон с образовавшимися трещинами представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Бетон с образовавшимися трещинами

Существует несколько путей образования и развития трещин в бетоне:

1. Трещины, образующиеся в процессе структурообразования бетона (их размеры малы, сравнимы с порами).
2. Трещины, образующиеся при статической нагрузке (при этом происходит развитие трещин, микротрещины, образовавшиеся в процессе структурообразования, сливаются в макротрещины).
3. Трещины, образующиеся при динамических нагрузках.
4. Трещины, образующиеся под воздействием атмосферы.
5. Трещины, образующиеся под воздействием попеременного

замораживания и оттаивания.

Необходимость повышения трещиностойкости бетонов обусловлена тем, что трещины оказывают прямое влияние на прочностные характеристики бетона, его долговечность и надежность.

1) Трещины, образующиеся в процессе структурообразования бетона

Образование трещин в бетоне происходит в цементном камне и практически невозможно их образование в заполнителе, так как прочность его выше. Одна из главных причин образования трещин - это усадка бетона.

Различают следующие виды усадки:

- контракционная;
- влажностная до схватывания (пластическая или первичная);
- влажностная после схватывания;
- карбонизационная;
- термическая.

Последствия усадочных деформаций показаны на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Трещина в бетоне, вызванная усадкой

Наиболее существенна влажностная усадка после схватывания, связанная с удалением воды в процессе твердения в воздушно-сухих условиях. При этой усадке образуются внутренние напряжения, ведущие к образованию трещин.

Введение в цемент тонкомолотых добавок, удерживающих воду, препятствует усадке. Такой же эффект дает введение в бетонную смесь пластифицирующих и воздухововлекающих добавок.

Одним из способов уменьшения усадки является максимальное наполнение объема бетона заполнителем.

На основе исследований было установлено, что цементный камень можно представить, как псевдотвердое тело с большим количеством пор и капилляров различных размеров. Одна из теорий основывается на том, что в бетоне после затвердевания происходит отток жидкости из пор и капилляров, и в них происходит поверхностное натяжение менисков жидкости. В капиллярах, радиус которых $r \leq 10^{-7}$ м, сила этого натяжения оказывается столь велика, что происходит обжатие бетона по всему объему, но эти усилия распределены неравномерно. К этому времени бетон набирает достаточную прочность, чтобы в нем действовали силы упругости, которые противодействуют силе давления со стороны капилляров. В определенный момент сила давления превышает силы упругости и образуется трещина. Размеры такой трещины несколько микрон, но она может со временем развиться в макротрещину, что отрицательным образом скажется на бетоне. Неравномерность распределения усилий по объему бетона обуславливает наличие экстремальных областей в цементном камне, где удельный вес трещин больше. Это объясняет неравномерность распределения прочности в бетоне и, как следствие, более низкую фактическую прочность по сравнению с теоретической.

Как известно, сила натяжения мениска жидкости обратно пропорциональна радиусу капилляра. Согласно этой теории капилляры с $r \geq 10^{-6}$ м не оказывают влияния на образование трещин.

Устранение такого трещинообразования может быть достигнуто путем уменьшения удельного веса в цементном камне капилляров с $r \leq 10^{-7}$ м, преобразованием их в макрокапилляры с $r \geq 10^{-6}$ м, и более равномерного их распределения по объему цементного камня. Такое преобразование бетона осуществляется через введение пластифицирующих и воздухововлекающих добавок.

Существенное влияние на трещиностойкость оказывают тонкость помола цемента и его расход. Чем больше тонкость помола цемента, тем ниже трещиностойкость бетона. При увеличении расхода цемента также снижается трещиностойкость. Связано это с тем, что нарастает количество цементного камня в единице объема бетона, что увеличивает количество пор с $r < 10^{-7}$ м. Это увеличивает неравномерную капиллярную усадку, а значит, и напряженное состояние и, как следствие, уменьшение трещиностойкости.

Небольшая добавка гипса в цемент может повысить трещиностойкость бетона. Однако при содержании гипса в цементе 3,3% в пересчете на SO_3 трещиностойкость становится минимальной. Дальнейшее увеличение гипса ведет к повышению трещиностойкости, но и одновременно к снижению прочности бетона.

Положительный эффект оказывает на трещиностойкость тепловлажностная обработка бетона. Это происходит за счет снижения пор с $r < 10^{-7}$ м.

Установлено, что водоцементное отношение влияет на $K_{тр}$ бетона. Увеличение В/Ц с 0,37 до 0,55 повышает трещиностойкость мелкозернистого бетона, и тем интенсивнее, чем меньше тонкость помола цемента.

Противоморозные добавки хлориды ($CaCl_2$, $NaCl$), сульфаты (Na_2SO_4 , $Al_2(SO_4)_2$), соли натрия и калия ($NaNO_3$, K_2CO_3), вводимые в бетоны, снижают трещиностойкость. И наоборот, добавки ПАВ в условиях переменной влажности повышают трещиностойкость бетона.

2) Трещины, образующиеся при статической нагрузке

Трещины присутствуют в цементном камне наряду с порами. Их размеры очень малы – доли микрона. Распределены трещины в бетоне крайне неравномерно, что обуславливает снижение фактической его прочности.

В процессе статического нагружения происходит развитие микротрещин и их слияние в макротрещину, гораздо большую по размерам и способную пройти через весь объем бетона (микротрещины, как правило, замкнуты и не пересекаются в свободном состоянии, т.е. без нагрузки).

По мере развития трещина может испытывать релаксации при встрече с зернами крупного заполнителя. Наиболее слабое место на пути трещины - это контактная зона между цементным камнем и крупным заполнителем. В момент, когда трещина доходит до контактного слоя, ее усилия распределяются в нем по периметру заполнителя. В результате продвижение трещины останавливается.

Другим фактором, отрицательно воздействующим на трещинообразование, является ползучесть бетона. Согласно теории ползучести под действием статических усилий бетон испытывает пластические деформации ползучести, что приводит к более равномерному распределению напряжений в бетоне от внешнего давления, таким образом, создаются менее благоприятные условия для развития трещин.

ГОСТ 29167 устанавливает методы испытаний бетонов всех видов (кроме ячеистых) для определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости при статическом кратковременном нагружении. Характеристики трещиностойкости определяют при равновесных и неравновесных механических испытаниях.

Неравновесные испытания на стадии локального деформирования образца характеризуются обеспечением адекватности изменения внешних сил внутренними усилиями сопротивляемости материала с соответствующим статическим развитием магистральной трещины.

Неравновесные испытания характеризуются потерей устойчивости процесса деформирования образца в момент локализации деформации по

достижении максимальной нагрузки, с соответствующим динамическим развитием магистральной трещины.

Определяемы по ГОСТ 29167 характеристики трещиностойкости (наряду с другими характеристиками механических свойств) используют для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества бетонов;
- сопоставления бетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- анализа причин разрушения конструкций.

3) Влияние динамических нагрузок на образование трещин

Бетон в процессе эксплуатации может испытывать динамические нагрузки, например, железобетонные шпалы, забивные сваи и др. При динамическом нагружении бетона процессы, протекающие в нем, имеют свои особенности.

Цементный камень – это псевдотвердое тело с большим количеством пор, в которых находится жидкость (вода). При динамических нагрузках, протекающих с большой скоростью, внешнее давление на бетон должно было бы его разрушить, но этого не происходит, т.к. возникают мощные силы упругости со стороны бетона. Это связано с тем, что вода в порах не успевает найти себе выхода, и выполняет роль упругой пружины при динамической нагрузке.

4) Воздействие атмосферы на трещинообразование

При эксплуатации открытых бетонных конструкций на воздухе, бетон подвергается попеременному увлажнению и высыханию. Механизм развития трещин происходит следующим образом: в процессе увлажнения поры заполняются водой, а в процессе сушки происходит отток воды из пор к поверхности материала, что сопровождается натяжением менисков жидкости и возникновением сил, сжимающих бетон по всему объему. В момент, когда

эти силы превысят силы упругости бетона, происходит дальнейшее развитие трещины.

5) Воздействие циклического замораживания и оттаивания

При увлажнении в трещину или пору попадает вода. Под воздействием отрицательных температур она превращается в лед, который с течением времени расширяется. Под воздействием этого давления стенки трещины расходятся, и она увеличивается в размерах. При следующем цикле замораживания вода займет в увеличившейся трещине больший объем, а давление льда увеличит объем трещины. Так происходит с каждым циклом.

Один из путей повышения морозостойкости бетонов - это введение в их состав веществ, увеличивающих содержание адсорбционное связанной воды, температура кристаллизации которой ниже, чем у свободной.

б) Трещинообразование в следствии сульфатной коррозии

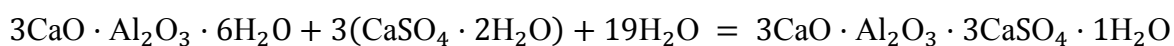
Бетон на гипсосодержащем заполнителе подвергается внутренней сульфатной агрессии с момента его затворения, в результате возникает самонапряжение, причем тем больше, чем больше гипса в заполнителе и в цементе. Внешней сульфатной коррозии бетон, может быть, подвергнут, если в цементном камне содержится большое количество СЗА, взаимодействующий с ионами SO_4^{2-} грунтовой воды, образует этtringит и приводит к разрушению из-за направленного роста кристаллов. Очевидно, что содержание гипса в заполнителе и цементе в достаточном количестве для быстрого связывания в этtringит все количество СЗА, имеющееся в цементе, то для последующей внешней сульфатной агрессии бетона уже нет возможностей.

Данный вид коррозии наблюдаем при использовании заполнителей с гипсом или воздействии растворов сульфатов.

В природных и промышленных водах часто содержатся сульфаты, которые вступают в обменную реакцию с гидроксидом кальция, тем самым образуя гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Цементный камень разрушается под давлением кристаллов двуводного гипса.

В природе весьма широко представлены сульфатно-хлоридно-магнезиальные среды. Морская вода, которая воздействует на бетон морских сооружений, представляет один из наиболее типичных представителей данных сред.

Возможны разные виды коррозии при воздействии на бетон минерализованной морской воды. Например, взаимодействие аниона SO_4^{2-} с катионом кальция Ca^{2+} происходит образование кристаллического двухводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Данный гипс слабо растворим в воде, но из-за роста кристаллов влечет появление трещин в порах и механического напряжения. В случае малого количества анионов SO_4^{2-} в воде возможна другая реакция:



В результате последней реакции образуется этtringит $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$. Именно этtringит и таумасит $\text{Ca}_6 [\text{Si}(\text{OH})_6]_2 (\text{SO}_4)_2 (\text{CO}_3)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ привлекли внимание исследователей. Этtringит в 2,5 раза больше по объему кристаллов исходного гидроалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, что способствует возникновению значительные растягивающих усилий в стенках пор и капилляров – под влиянием этих усилий они разрушаются и образуются трещины.

Исследования показывают, что образование трещин происходит в три этапа:

- раскрытие трещины, на которое требуется самое большое количество энергии;
- дальнейшее развитие трещины, продвижение ее по цементному камню;
- проход трещины, через весь объем бетона, сопровождаемый его разрушением.

Важной особенностью процесса трещинообразования является то, что на каждый последующий этап энергии требуется меньше, чем на предыдущий.

Исследовательские усилия, направленные на увеличение трещиностойкости, должны быть сосредоточены на уменьшении числа трещин в объеме цементного камня, препятствуя их образованию. Этому можно добиться, влияя на структурообразование бетона введением добавок, препятствующих развитию внутренних напряжений в нем и способствующих усреднению его структуры.

С целью повышения эксплуатационных характеристик бетонов, устранения последствий усадочных явлений в конструкциях из бетонов общестроительного назначения в настоящее время широко используются расширяющие и напрягающие цементы, состоящие из портландцемента и расширяющего компонента. Использование этих расширяющих добавок при изготовлении бетона на портландцементе обеспечивает конструкции долговечность, водонепроницаемость, трещиностойкость. Бетон, изготовленный на портландцементе с использованием расширяющей добавки, имеет высокие физико-механические характеристики, в том числе пониженную величину усадки.

1.4 Применение бетонов на основе расширяющих добавок в строительстве

Современное строительство ставит перед производителями бетонов ряд задач относительно качества и свойств бетона. Исходя из специфики технологии строительства предъявляются требования к прочности, трещиностойкости, водонепроницаемости, безусадочности и так далее. Так одной из основных задач строительства на сегодняшний день является разработка и внедрение новых эффективных материалов, обеспечивающих надежность и долговечность. У производителей появилась возможность выпускать модифицированные бетоны с заданными характеристиками и свойствами благодаря применению различных химических и минеральных добавок в составах бетона. Например, применение расширяющих добавок

позволяет обеспечить в бетоне на портландцементе высокую прочность, низкую проницаемость и пониженные значения усадочных деформаций.

Проблеме усадки и ее влиянию на свойства бетона посвящены многие теоретические и экспериментальные исследования в нашей стране и за рубежом. Усадочные деформации в сочетании с низкой прочностью бетона на растяжение приводят к появлению трещин в железобетонных конструкциях, особенно в поверхностном слое, повышают их деформативность, снижают долговечность. Одним из способов устранения отрицательных последствий усадки является применение в качестве вяжущего напрягающего цемента (НЦ), состоящего из портландцемента и расширяющего компонента. Применение бетонов с расширяющими добавками позволит исключить деформации и избежать образования трещин в процессе изготовления бесшовных протяженных монолитных конструкций. За счет регулируемого расширения в процессе твердения нейтрализуется проявление усадки и создается в железобетонной конструкции предварительное напряжение всей находящейся в ней и растягиваемой при этом (за счет сцепления с бетоном) арматуры и получение собственного обжатия (самонапряжения) бетона без дополнительных операций и использования специальных машин и оборудования. В результате, обеспечивается водонепроницаемость и трещиностойкость конструкции. Благодаря своей структуре такие бетоны являются практически водонепроницаемыми, обладают высокой стойкостью при воздействии агрессивных сред, в том числе сульфатных, они заметно повышают долговечность сооружений.

Бетон на напрягающем цементе, имеющем в своей основе портландцемент, обладает всеми его свойствами, но вместе с тем характеризуется рядом отличительных особенностей, а именно расширением и величиной энергии самонапряжения. Бетоны на напрягающих цементах подразделяются на напрягающие – с расчетной величиной самонапряжения и бетоны с компенсированной усадкой – с ненормируемой величиной

самонапряжения. Применение таких бетонов позволяет возводить бесшовные конструкции большой протяженностью (до 500 м) с повышенной трещиностойкостью и водонепроницаемостью за счет разработанной специальной технологии. Механизм твердения напрягающего бетона основан на создании направленного кристаллообразования в твердеющем цементном камне и обеспечении тем самым регулируемого объема расширения, которое происходит в пластической структуре материала, при этом в условиях ограничения расширения развивается самоупрочивающее напряжение, компенсирующее растягивающее напряжение. В конструкциях из такого бетона имеется возможность регулировать площадь поперечного сечения при обеспечении их долговечности, которая создана благоприятной структурой для низкой проницаемости, в том числе диффузионной, что препятствует развитию коррозии, как самого бетона, так и стальной арматуры при воздействии различных агрессивных сред.

В соответствии высокими эксплуатационными характеристиками бетонов нового поколения существует ряд перспективных направлений их применения в различных областях строительства, таких как: подземные ограждающие конструкции, тоннели, в том числе метрополитенов, мостовое строительство, комбинированный вариант совместимости работ старого и нового бетона для обеспечения трещиностойкости и бесшовности конструкций большой протяженности. Например, в Киеве и Минске были возведены станции метрополитена с применением расширяющих добавок в бетоне. Стадион «Динамо» в Москве, «Раздан» в Ереване, «Пахтакор» в Ташкенте, стадион им. С.М. Кирова в Санкт-Петербурге, ограждающие конструкции офисных зданий, например, ЦВЗ «Манеж», библиотека МГУ, улица Кожевническая, Семеновская, Лефортовский Вал и жилых помещений на Ленинском проспекте, улице Малыгина, Академика Павлова, Гвардейская в городе Москва. При этом во всех объектах была отменена гидроизоляция, ибо напрягающий бетон благодаря плотной структуре обладает водонепроницаемостью W16-W20.

Более 20 лет опыт эксплуатации зданий показал надежность конструктивных решений и качество напрягающего бетона при возведении ограждающих конструкций подземной части зданий и сооружений. Конструкции, выполненные из такого бетона, совмещают функции несущих конструкций и гидроизоляционного ковра. Бетоны изготавливают на основе портландцемента, стандартных заполнителей и комплексной добавки. В состав комплексной добавки входит модифицированная добавка, позволяющая получать бетоны с регулируемой степенью расширения и нейтрализацией усадочных деформаций. Благодаря созданию плотной структуры бетоны отличаются повышенной водонепроницаемостью. При возведении монолитных конструкций применение такого бетона может частично или полностью исключить устройство гидроизоляции, что влечет за собой ощутимый экономический эффект до 20% экономии расхода бетона и арматуры.

Применение в составе бетона вяжущего на основе портландцемента и расширяющей добавки приводит к улучшению эксплуатационных характеристик бетонов – морозостойкости, прочности при сжатии и изгибе и водонепроницаемости. При одном и том же расходе цемента бетон с компенсированной усадкой может выдержать 500 циклов попеременного замораживания и оттаивания, обычный бетон (на портландцементе без добавки) – 300 циклов. Прочность бетона с компенсированной усадкой может составить 60 МПа, прочность бетона при таком же расходе цемента, но без добавки, - всего 40 МПа. Марка по водонепроницаемости обычного бетона может быть равна W6, бетона с компенсированной усадкой – W14.

Экономический эффект применения бетонов с компенсированной усадкой в конструкциях подземной части зданий за счет отмены гидроизоляции типов «Волтекс», «Телефонд», «Рапидолекс», «Сармафил» и других составляет от 900 руб. до 2432 руб. на 1 м² поверхности. При этом сроки строительства и трудозатраты сокращаются в 1,5-2 раза.

Таким образом, применение бетона с расширяющими добавками обеспечивает надежность и долговечность конструкций, позволяет сократить сроки строительства, межремонтных работ и существенно уменьшить расход арматуры. Введение расширяющей добавки в бетон позволяет отказаться от любого вида гидроизоляции различных сооружений и конструкций, повышает трещиностойкость и появляется возможность получения монолитной бесшовной конструкции протяженностью до 500 м.

Расширяющийся бетон производят с использованием безусадочного и напрягающего цемента, также добавляя заполнители различных фракций. Свойства полученного в итоге бетона позволяют эффективно применять его как в сборных железобетонных конструкциях, так и в монолитном строительстве.

Примерами являются:

- увеличение несущей способности на 12-16 % при строительстве проезжей части и несущих элементов мостов;
- увеличение эксплуатационных характеристик ж/б труб высокого давления;
- строительство метрополитена (туннели и пр.);
- строительство конструкций спортивного профиля (крытые арены и пр.);
- устройство промышленных полов;
- монтаж кровельного покрытия;
- устройство гидроизоляционных покрытий, которые наносятся торкретированием;
- строительство таких объектов как ТЭЦ, АЭС и другие.

На практике двумя основными видами расширяющихся материалов являются:

- с нормируемой величиной самоупрессия;
- с ненормируемой величиной самоупрессия (с компенсированной усадкой).

Также, помимо выше указанных категорий, существует отдельная группа расширяющихся мелкозернистых смесей, которые применяют для ремонтно-восстановительных работ.

Рассмотрим технические характеристики напрягающих бетонов. ГОСТ Р 56727-2015 «Цементы напрягающие. Технические условия».

В зависимости от значения самоупругения напрягающие цементы подразделяют на четыре типа:

- цементы с низкой энергией самоупругения с самоупругением менее 0,7 МПа;
- цементы с малой энергией самоупругения с самоупругением от 0,70 до 2,0 МПа;
- цементы со средней энергией самоупругения с самоупругением от 2,0 до 3,0 МПа;
- цементы с высокой энергией самоупругения с самоупругением более 3,0 МПа.

Классы и подклассы напрягающих цементов в зависимости от их типа приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классы и подклассы напрягающих цементов

Тип цемента	Обозначение типа	Класс прочности	Подкласс прочности
1	2	3	4
Цемент с низкой энергией самоупругения	НЦ-5	32,5	Н
		32,5	Б
		42,5	Н
		42,5	Б
Цемент с малой энергией самоупругения	НЦ-10	32,5	Н
		32,5	Б
		42,5	Н
		42,5	Б

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Цемент со средней энергией самонапряжения	НЦ-20	32,5	Н
		42,5	Н
Цемент с высокой энергией самонапряжения	НЦ-30	32,5	Н
		42,5	Н

Линейное расширение и самонапряжение цемента в возврате 28 суток должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Линейное расширение и самонапряжение цемента

Наименование показателя	Значение для цемента типа			
	НЦ-5	НЦ-10	НЦ-20	НЦ-30
Линейное расширение, %, не более	0,3	1,0	1,5	2,0
Самонапряжение, МПа (кг/см^2), не менее	-	0,7 (7)	2,0 (20)	3,0 (30)

Технические характеристики и свойства напрягающих бетонов (ГОСТ 32803-2014 «Бетоны напрягающие. Технические условия»):

Прочность бетона в проектном возрасте характеризуется классами прочности на сжатие, осевое растяжение и растяжение при изгибе.

Для тяжелых напрягающих бетонов установлены следующие классы:

– по прочности на сжатие: В20; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60; В70; В80; В90;

– по прочности на осевое растяжение: $V_{t0,8}$; $2V_{t1,2}$; $V_{t1,6}$; V_{t2} ; $V_{t2,4}$; $V_{t2,8}$; $V_{t3,2}$; $V_{t3,6}$; $V_{t4,0}$;

– по прочности на растяжение при изгибе: V_{tb2} ; $V_{tb2,4}$; $V_{tb2,8}$; $V_{tb3,2}$; $V_{tb3,6}$; V_{tb4} ; $V_{tb4,4}$; $V_{tb4,8}$; $V_{tb5,2}$; $V_{tb6,4}$; $V_{tb6,8}$.

Для легких напрягающих бетонов установлены следующие классы:

- по прочности на сжатие: B10; B12,5; B15; B20; B25; B30; B35; B40;
- по прочности на осевое растяжение: B_t0,8; B_t1,6; B_t2; B_t2,4; B_t2,8; B_t3,2.

Допускается при соответствующем обосновании устанавливать более высокие классы напрягающих бетонов по прочности.

В зависимости от средней плотности устанавливают следующие марки напрягающего бетона:

- легкого: D1200; D1300; D1400; D1500; D1600; D1700; D1800; D1900; D2000;
- тяжелого: D2000, D2100, D2200, D2300, D2400, D2500.

В зависимости от значения самоупругения устанавливают следующие марки напрягающего бетона: Sp0,6; Sp0,8; Sp1,0; Sp1,2; Sp1,5; Sp2,0; Sp3,0; Sp4,0.

Напрягающие бетоны марок по самоупругению от Sp0,6 до Sp1,0 относятся к бетонам с компенсированной усадкой, от Sp1,2 до Sp4,0 – к напрягающим бетонам с нормируемым самоупругением.

В зависимости от условий применения напрягающие бетоны должны иметь следующие марки по морозостойкости: тяжелые (F₁200, F₁300, F₁400, F₁600, F₁800) и легкие (F₁100, F₁200, F₁300, F₁400, F₁500).

В зависимости от водонепроницаемости напрягающие бетоны должны иметь следующие марки: тяжелые (W12, W14, W16, W18, W20) и легкие (W8, W10, W12, W14).

Выводы по первой главе:

В первой главе изучили механизм усадки в бетоне, рассмотрели факторы, влияющие на трещинообразование в бетоне, изучили типы расширяющих добавок и рассказали о применении бетонов на основе расширяющих добавок в строительстве.

2 Характеристики используемых материалов и методы исследований

2.1 Методы исследований

Экспериментальная часть диссертационной работы проводилась в лаборатории «Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства» «Архитектурно-строительного института Тольяттинского Государственного Университета.

«Определение прочности бетона состоит в измерении минимальных усилий, разрушающих специально изготовленные контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки, и последующем вычислении напряжений при этих усилиях» [5].

Экспериментально истинное значение случайной величины определить не получится, поэтому на практике берётся среднее арифметическое значение. Полученное значение максимально приближено к истинному, поэтому можем воспользоваться таким методом.

Числовое значение искомой величины получают несколькими способами измерений: совместный, совокупный, прямой и косвенный. Это необходимо учитывать при проверке данных, полученных во время эксперимента и расчёте погрешностей. Погрешности бывают систематическими и случайными, и возникают при многократных измерениях. При проведении всего одного измерения данных обязательно будет случайная погрешность, да и проверить такую погрешность при таком раскладе никак не получится. Случайная погрешность всегда будет присутствовать при измерениях. В данной же работе выделяется некоторый ряд систематических ошибок:

- погрешности приборов и оборудования (измерительные приборы, весы, пресс гидравлический и прочее);
- внешняя среда (температура, влажность воздуха и прочее).

При измерениях есть необходимость прибегать к ряду практических рекомендаций, которые вытекают из положений теории вероятности, тем самым, можно получить максимально близкое к истинному значению число.

Достоверность полученных экспериментальных значений подтверждается данными обработками многократных наблюдений с построением соответствующих доверительных интервалов для каждой серии многократных наблюдений. Общая относительная погрешность рассчитывалась методами учета доверительных интервалов и не исключенных остатков систематических погрешностей, в том числе по рекомендациям ГОСТ 8.207-76.

Оптимизация состава бетона определяется расчётно-экспериментальным методом, который включает в себя:

- формирование состава с исходных данных, таблиц, графиков и формул;
- подбор состава методом пробных замесов;
- определение фактического расхода материалов, из которых будет состоять 1 м³ бетона, исходя из расхода составляющих самого оптимального замеса, учитывая объем замеса.

В итоге, состав бетона принимается:

- в виде расхода материалов на 1 м³ бетона;
- в частях по массе;
- по объему по отношению к цементу.

Для проведения испытаний использовали природные Камский и Волжский песок в качестве мелкого заполнителя. Песок был выбран в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Определение зернового состава происходит с помощью просева мелкого заполнителя через стандартный набор сит. Перед просевом песок необходимо просушить в сушильном шкафу до постоянной массы. Применяются сито с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и набор из

проволочных сит со стандартными ячейками <0,16 мм, 0,16 мм, 0,315 мм, 0,63 мм и 1,25 мм. «Навеску сухого песка просеивают через набор сит и определяют сначала частные (%), а затем полные остатки на каждом сите. Полный остаток на любом сите равен сумме частных остатков на этом сите и всех ситах большего размера. Размеры полных остатков характеризуют зерновой состав песка» [9].

Просеивание осуществляется ручным способом. Допускается определять окончание просеивания встряхивая каждое из сит над листом бумаги. Просеивание считают законченным, если не наблюдается падение зерен песка.

Частный остаток на каждом из сит a_i определяют по формуле 2.1.

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, [\text{г}] \quad (2.1)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса просеиваемой навески, г.

Полный остаток на каждом из сит A_i определяют по формуле 2.2.

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,5} + \dots + a_i, [\text{г}] \quad (2.2)$$

где $a_{2,5}$, $a_{1,5}$, a_i – частные остатки на соответствующих ситах.

Модуль крупности песка определяют по формуле 2.3.

$$M_\kappa = \frac{A_{2,5} + A_{1,5} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}, \quad (2.3)$$

где $A_{2,5}$, $A_{1,5}$, $A_{0,63}$, $A_{0,315}$, $A_{0,16}$ – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и на ситах с сетками 1,5, 0,63, 0,315, 0,16 мм.

Насыпную плотность определяют путем взвешивания песка в мерных сосудах. Песок насыпают при помощи совка в мерный сосуд объемом $V=1$ дм^3 с высоты 10 см от верхнего края до образования цилиндра конуса, далее излишки срезают, а сосуд взвешивают, и определяют насыпную плотность по формуле 2.4.

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V}, \text{ [кг/м}^3\text{]} \quad (2.4)$$

где m_1 – масса мерного сосуда с песком, кг;

m – масса, предварительно взвешенного, мерного сосуда, кг;

V - вместимость сосуда, м^3 .

Щебень с фракцией 5-10 мм из гранодиоритов использовался как крупный заполнитель.

Качество щебня определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

«Насыпная плотность $P_{\text{нас}}$ определяется путем взвешивания пробы заполнителя в сосуде с известной вместимостью по формуле:

$$P_{\text{нас}} = (m - m_c) / V_c, \quad (2.5)$$

где m - масса пробы заполнителя с сосудом, кг;

m_c - масса сосуда, кг;

V_c - вместимость сосуда, м^3 .» [10].

«Прочность крупного заполнителя определяется методом раздавливания его пробы в сухом или насыщенном водой состоянии в металлическом цилиндре с вычисление показателя дробимости D_r (%). Дробимость заполнителя оценивается по количеству мелочи, образующейся

при сдавливании пробы щебня в стальной форме под определенным усилием» [3].

Показатель дробимости D_p (%) вычисляют с погрешностью до 1% по формуле:

$$D_p = (m_1 - m_2 / m_1) 100, \quad (2.6)$$

где m_1 – испытываемая проба щебня, кг;

m_2 - остаток на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня, кг.

«Марку щебня определяют по показателю дробимости в зависимости от вида горной породы и способа испытания» [10].

«Содержание в щебне пластинчатых (лещадных) и игловатых зёрен определяется визуально отбором в навеске зёрен, толщина или ширина которых меньше длины в три и более раза. Взвешивают количество пластинчатых (лещадных) и игловатых зёрен и вычисляют их содержание в % по массе. Исходя из результатов, определяют группу щебня по содержанию зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы» [10].

Образцы для испытаний были приготовлены партиями.

Перед изготовлением образцов для испытаний, необходимо произвести оценку подвижности бетонной смеси в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014. Осадка конуса (ОК) является показателем, который характеризует подвижность смеси.

«Испытания проводят, применяя конус, металлическую линейку, загрузочную воронку, кельму, прямой металлический гладкий стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм с округленными концами.

Конус устанавливают на гладкий лист и заполняют бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой уплотняют штыкованием металлическим стержнем в нормальном конусе 25 раз, в увеличенном – 56 раз. Конус во время

заполнения и штыкования должен быть плотно прижат к листу. После уплотнения бетонной смеси снимают загрузочную воронку, избыток смеси срезают кельмой вровень с верхними краями конуса и заглаживают поверхность бетонной смеси. Время от начала заполнения конуса до его снятия не должно превышать 3 мин. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх конуса и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до поверхности бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см. Осадка конуса из бетонной смеси в сантиметрах служит показателем подвижности.

Приготовленную смесь укладывают в металлические формы (кубические и призматические). Далее уложенную смесь уплотняют на виброплощадке, после приготовления образцы хранят в течение суток, покрывая их влажной тканью для того, чтобы исключить испарение влаги из образцов. Распалубливание образцов ведут по достижении 24 часов с момента укладки, после хранят их в течение 7, 14 и 28 суток в нормальных условиях твердения ($t=20\pm 5$ °С, относительная влажность воздуха - 95 ± 5 %).» [11].

Одними из главных методов испытаний является определения предела прочности бетона на сжатие.

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ образцов определяли разрушающим методом, при помощи гидравлического пресса с нагрузкой 125 и 250 т. по формуле 2.8 по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Нагрузка на образцы прикладывалась плавно без резких скачков.

$$R_{сж} = \frac{P_{разр}}{F}, \quad (2.8)$$

где $P_{разр}$ - разрушающая сжимающая сила, МПа;

F - первоначальная площадь образца (в $см^2$), равная среднему арифметическому площадей обеих опорных граней, округленная до 0,1 $см^2$.

2.2 Характеристики используемых материалов

При выполнении экспериментов использовались следующие материалы:

1) Песок

Для проведения испытаний использовали природный Камский песок в качестве мелкого заполнителя.

Песок был выбран в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Гранулометрический состав Камского песка 0,5 мм приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Гранулометрический состав Камского песка

№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
2,5	34,03	34,03
1,25	20,23	52,96
0,63	17,91	72,92
0,315	18,89	92,14
0,16	8,11	97,91
< 0,16	0,83	100,0
	100,0	
$M_{кр}$	3,499	

В соответствии с таблицей 1 ГОСТ 8736–2014 природный Камский песок по своему модулю крупности относится к группе песков «повышенной крупности».

Фотография Камского песка представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Камский песок

2) Цемент

При выполнении экспериментальных исследований в качестве вяжущего материала использовался портландцемент ЦЕМ I 42.5Н торговой марки ООО «Холсим (РУС)» (рис. 2.2).

Согласно ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» ЦЕМ I 42.5Н представляет собой портландцемент, имеющий следующие показатели:

- 1) нормальноотвердевающий;
- 2) класс прочности: 42,5;
- 3) содержание портландцементного клинкера: более 95%;
- 4) удельная поверхность по Блейну: 3238 см²/г;
- 5) остаток на сите с размером отверстий 45 мкм: 5,2%.



Рисунок 2.2 – Портландцемент ЦЕМ I 42.5Н торговой марки ООО «Холсим (РУС)»

В область применения портландцемента ЦЕМ I 42.5Н входит: производство товарного бетона для рядовых конструкций, сборных железобетонных элементов, мелкоштучных бетонных изделий, сухих строительных смесей.

Химический состав данного цемента приведен в таблице 2.2, а минералогический состав клинкера в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Химический состав ЦЕМ I 42.5Н (в %)

Показатель	Фактическое значение	Предел значения по ГОСТ 31108-2016
1	2	3
SiO ₂	20,0	-
Al ₂ O ₃	4,0	-
CaO	64,2	-
Fe ₂ O ₃	3,3	-

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
MgO	1,0	-
TiO ₂	0,2	-
P ₂ O ₅	0,2	-
SO ₃	3,0	Не более 3,5
Na ₂ O	0,3	-
K ₂ O	0,9	-
Na ₂ Oэкв.	0,8	-
П.П.П.	2,6	Не более 5
Cl	0,01	Не более 0,1

Таблица 2.3 – Минералогический состав клинкера (в %) для ЦЕМ I 42.5Н

Показатель	Фактическое значение
C ₃ S	73,0
C ₂ S	8,7
C ₃ A	5,3
C ₄ AF	11,6
CaOсв	0,6

Цемент востребован среди крупных застройщиков, которые специализируются на возведении следующих видов зданий и сооружений:

- офисные помещения;
- жилые дома;
- промышленные здания;
- медицинские учреждения;

- образовательные учреждения;
- торгово-развлекательные центры;
- дорожные развязки;
- мосты;
- спортивные центры.

Данный цемент широко используется в строительстве зданий и сооружений, с высокими требованиями к водостойкости, морозостойкости и долговечности.

3) Щебень

Щебень с фракцией 5-10 мм из гранодиоритов использовался как крупный заполнитель.

В таблице 2.4 представлены технические характеристики щебня, состоящего из гранодиоритов щебеночного завода «Гумбейский», который находится в Челябинской области, Агаповском районе.

Таблица 2.4 – Технические характеристики щебня

Характеристика	Значение характеристики
Насыпная плотность	1470 кг/м ³
Марка по дробимости	M1400
Марка по истираемости	И1
Морозостойкость	F300
Содержание зерен игловатой и пластинчатой формы	I группа (до 10% включительно)
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов	I класс для всех видов строительства, <370 Бк/кг

Вредные примеси, зерна более слабых пород и комки глины в щебне не содержатся.

В таблице 2.5 предоставлены данные по химическому составу щебня из гранодиоритов.

Таблица 2.5 – Химический состав щебня

Химический элемент	Процентное содержание
SiO ₂	61,07
Fe ₂ O ₃	5,9
Al ₂ O ₃	17,23
CaO	9,13
MgO	3,44
K ₂ O	0,66
Na ₂ O	0,3

Фотография щебня представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Щебень с фракцией 5-10 мм

4) Зола-уноса

Зола-уноса является одной из самых доступных видов алюмосодержащих отходов. В последнее время золу-уноса широко применяют в строительстве как для создания вяжущих, так и в виде отдельной добавки в бетон.

Зола-уноса представляет собой тонкодисперсный продукт высокотемпературной обработки минеральной части угля. Зола-уноса образуется при сжигании минеральной части угля, который находится в пылевидном состоянии в топках котлов, и улавливается устройствами из дымовых труб.

Золу-уноса получают электростатическим или механическим осаждением пылевидных частиц из отходящих газов агрегатов, в которых сжигают измельченный уголь или горючий сланец.

Зола-уноса по своему химическому составу может быть кислой (богатой SiO_2) либо основной (богатой CaO). Первая проявляет пуццоланические свойства, вторая может дополнительно проявлять гидравлические свойства.

Содержание щелочных оксидов (R_2O) в золе-уноса в пересчете на Na_2O должно быть не более 2,0% (масс.), содержание MgO – не более 5% (масс.). Потери массы при прокаливании (п.п.п.) золы-уноса не должно превышать 5,0% (масс.) (кроме сланцевой золы-уноса). Допускается применение золы-уноса с п.п.п. до 7,0% (масс.) при условии, что выполняются требования к долговечности и сочетаемости цементов с добавками к бетонам и растворам. При использовании в составе цементов зол-уноса с п.п.п. свыше 5,0% до 7,0% (масс.) предельное значение п.п.п. 7% (масс.) указывают на упаковке и в товаросопроводительной документации.

Равномерность изменения объема (расширение) цемента с добавкой золы-уноса должна быть не более 10 мм.

Для производства цементов используют золы-уноса, для которых значение t -критерия, определенное по ГОСТ 25094, составляет не менее 15.

Кислая зола-уноса представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий преимущественно из сферических частиц, обладающий пуццоланическими свойствами и состоящий в основном из реакционноспособных SiO_2 и Al_2O_3 . Остальное – Fe_2O_3 и другие соединения.

Содержание реакционноспособного SiO_2 в кислой золе-уноса должно быть не менее 25,0% (масс.).

Массовая доля реакционноспособного CaO в кислых золах-уноса должна быть менее 10,0% (масс.), массовая доля свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) – не более 1% (масс.). Допускается использование для производства цементов кислых зол-уноса с содержанием $\text{CaO}_{\text{св}}$ до 2,5% (масс.) при соблюдении требований к равномерности изменения объема.

Основная зола-уноса представляет собой тонкодисперсный материал, проявляющий гидравлические и (или) пуццоланические свойства и состоящий в основном из реакционноспособных CaO , SiO_2 и Al_2O_3 . Остальное – Fe_2O_3 и другие соединения.

Массовая доля реакционноспособного CaO в применяемых основных золах-уноса должна быть не менее 10% (масс.). Золо-уноса с содержанием реакционноспособного CaO от 10% до 15% по массе должны содержать не менее 25% (масс.) реакционноспособного SiO_2 .

Если содержание оксида серы (SO_3) в золах-уноса превышает предельное содержание SO_3 для цемента, установленное стандартом или технологической документацией, утвержденной предприятием-изготовителем, то это учитывают при изготовлении цемента путем соответствующего уменьшения содержания сульфата кальция в цементе.

Зола-уноса в составе бетонной смеси выполняет роль активной минеральной добавки, которая увеличивает общее количество вяжущего, а также служит микронаполнителем, который активно влияет на процессы структурообразования бетона.

Отличие золы-уноса от других минеральных наполнителей в том, что при введении её в состав бетонной смеси она, как правило, не ухудшает, а

улучшает её удобоукладываемость, что объясняется шаровидной формой частиц золы. Помимо этого, введение золы-уноса приводит к снижению водоотделения бетонной смеси.

Микроструктура частиц золы-уноса представлена на рисунке 2.4.

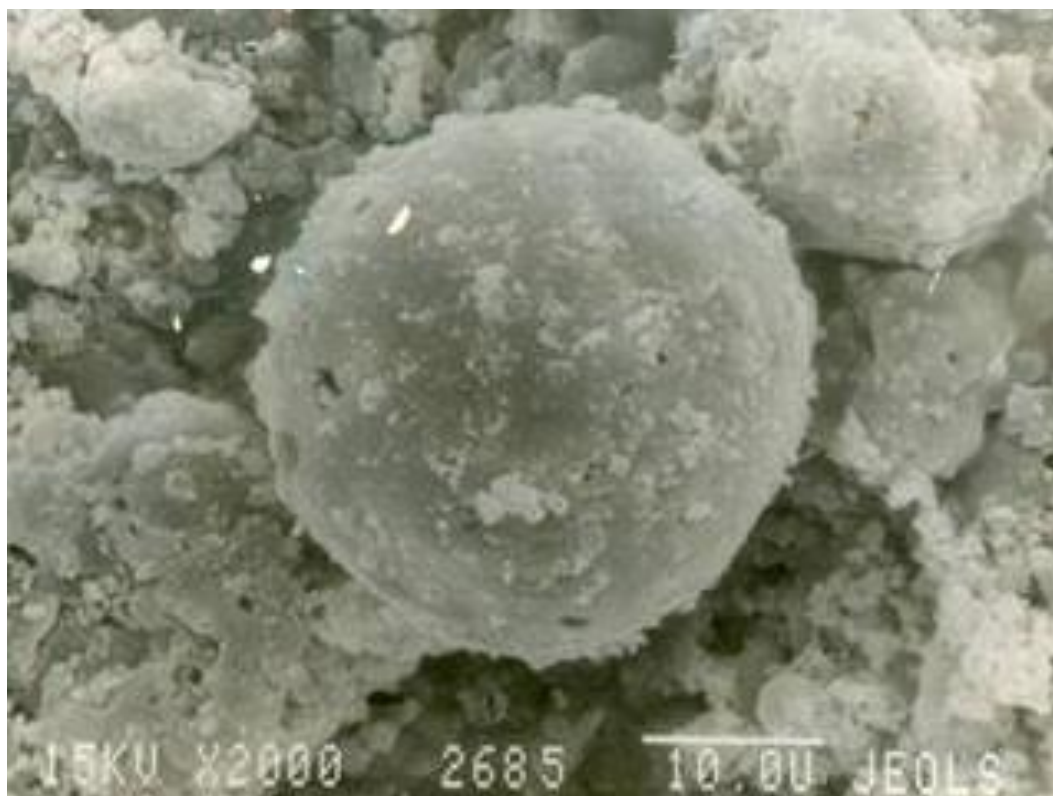


Рисунок 2.4 – Микроструктура частиц золы-уноса

Бетонные смеси с оптимальной добавкой золы имеют достаточно высокую жизнеспособность и пригодны для транспортировки на дальние расстояния.

Замещение части цемента золой приводит к уменьшению усадочных деформаций бетона вследствие снижения водопотребности бетонной смеси. Уменьшение усадки объясняется также тем, что зола адсорбирует из цемента растворимые щелочи с образованием устойчивых нерастворимых алюмосиликатов. Испытания бетона длительной нагрузкой показали, что введение золы также снижает ползучесть бетона. Введение оптимального

количества золы-уноса (1,5%) позволяет повысить прочность цементного камня на 10 – 15%.

Также стоит отметить что добавление золы-уноса в бетонную смесь приводит к повышению коррозионной стойкости бетонов, а также повышает их водонепроницаемость.

Фотография золы-уноса представлена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Зола-уноса

В работе используем золу-уноса Алексинского керамзитового завода. В составе данной золы-уноса содержится множество высокоактивных оксидов алюминия и кремния.

Особенности золы-уноса:

- средний размер зёрен: 80 микрон;
- истинная плотность: 2,27 г/см³;
- удельная поверхность: 5-10 м кв./г;

– содержание активного кремнезема: 47%.

Химический состав золы-уноса представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав золы-уноса

Химический элемент	Процентное содержание
SiO ₂	50
Al ₂ O ₃	35,3
FeO+Fe ₂ O ₃	4,6
CaO	6,7
MgO	0,5
TiO ₂	1,4
Na ₂ O+K ₂ O	1,1
SO ₃	0,1
П.П.П.	2,5

На практике также встречаются случаи, когда в состав бетонной смеси добавляют сразу несколько минеральных наполнителей, тем самым комбинируя их. Так, к примеру, зола-унос в сочетании с микрокремнеземом, позволяет достигнуть снижения деформации усадки и ползучести в бетоне; а сочетание метаксаолина и золы от сжигания рисовой шелухи (с использованием гиперпластификаторов в составе смеси) приведет к повышению предела прочности бетона при сжатии до 70%, а также к повышению модуля упругости бетона до 15% и снижению контрактционной усадки до 30%.

5) Гипсовый камень

Гипсовый камень (CaSO₄·2H₂O) рассматривается в качестве сульфатного компонента расширяющей добавки. Его считают одним из

самых стабильных материалов, соответственно, гипсовый камень самый часто используемый среди сульфатосодержащих продуктов. В данном случае расширение бетонной смеси происходит благодаря образованию этtringита.

Химический состав, используемого гипсового камня представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Химический состав гипсового камня

Химический элемент	Процентное содержание
SiO ₂	5,07
Al ₂ O ₃	1,3
Fe ₂ O ₃	0,57
CaO	30,4
MgO	3,76
SO ₃	43,3

На рисунке 2.6 представлена фотография гипсового камня.

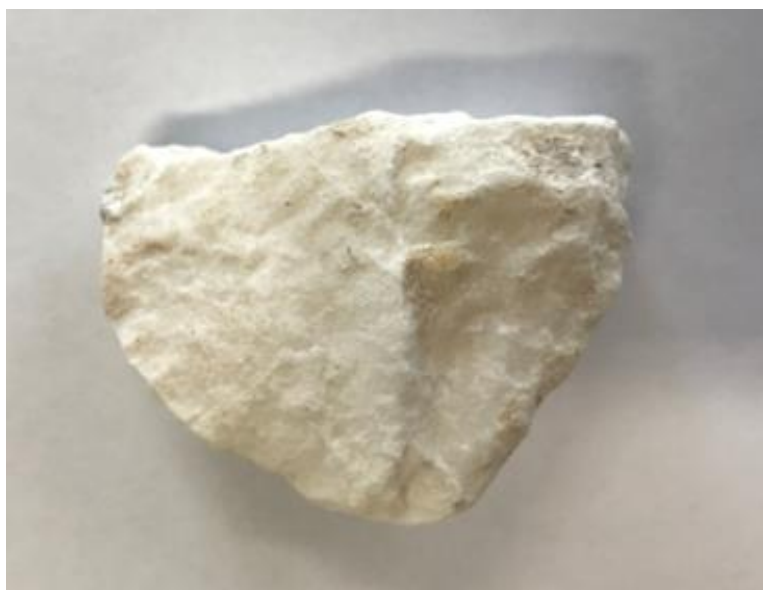


Рисунок 2.6 – Гипсовый камень

б) Пластификатор

На сегодняшний день тяжело представить современное строительство без добавок, которые способны усовершенствовать свойства бетона.

«Добавка — это продукт, вводимый в бетонные и растворные смеси с целью улучшения их технологических свойств, повышения строительно-технических свойств бетонов и растворов и придания им новых свойств» [16].

Расширяющие добавки положительно влияют на самые важные характеристики бетона. Самой главной задачей расширяющих добавок является предотвращение усадки бетона. Еще есть пластифицирующие добавки, плюсом данных добавок является уменьшение водосодержания в бетонных смесях. Добавление воды больше, чем необходимо для химической реакции, подразумевает собой увеличение текучести бетонной смеси, но при этом прочность бетона становится хуже. Ведь чем меньше воды в содержании цементной смеси, тем прочнее будет полученный бетон. И именно рассматриваемые добавки позволяют достичь нужную текучесть смеси без потери ее прочности.

Стоит лишь применять количество воды, необходимое для процесса гидратации. Воплотить это на практике очень трудно. Причиной этому является неправильная укладка. Именно для таких случаев и были придуманы пластификаторы в 40-х годах. Сегодня нашли большее применение пластификаторы нового поколения.

Явные преимущества:

- при незначительном количестве воды с помощью пластификаторов значительно достигается текучесть смеси;
- расход рабочей смеси ощутимо снижается, соответственно себестоимость строительных работ уменьшается;
- раствор с добавлением пластификаторов лучше контактирует с поверхностью рабочего материала;

– достигается газонепроницаемость, значительно повышается водоустойчивость раствора;

– температура замерзания рабочей смеси заметно снижается;

– цементная смесь становится прочнее.

Виды пластификаторов:

1. Пластификаторы. Основное назначение – обеспечение подвижности рабочей смеси. При этом одновременно увеличивается водонепроницаемость и общая прочность бетона. Сохранение прочности не сказывается на повышенном расходе цемента.

2. Компоненты, способствующие регулировке подвижности рабочей смеси на основе бетона. Крайне необходимы летом, когда на улице жаркая погода. Актуальны эти добавки во время транспортировки строительной смеси. Сегодня транспортировка отнимает много времени, из-за часовых пробок в больших городах.

3. Добавки-ускорители набора прочности. Их применение позволяет повысить марочную прочность бетона.

4. Модификаторы цементных смесей – разработаны для повышения коррозионной стойкости, долговечности бетона, одновременно улучшая подвижность рабочей смеси.

5. Специальные компоненты, делающие строительство возможным в зимнее время. Работы с бетоном могут проводиться при температурном режиме 20-15 °С ниже нуля.

6. Комплексные добавки. Этот вид пластификаторов позволяет достигать несколько задач одновременно. Например, можно совместить решение таких задач, как улучшение показателей текучести и морозостойкости.

«Пластификаторы, изготовленные на основе меламино- и нафталиноформальдегидных смол наиболее технологически эффективны в настоящее время. Основное направление действия пластификаторов – это разжижение бетонной смеси до высокоподвижной и литой консистенции. Вводится

данная добавка в количестве 0,3-0,6%, для обеспечения необходимого количества влаги (снижает расход воды) и повышения физико-механических характеристик бетона. Пластификатор на ранних стадиях взаимодействия цемента с водой дезагрегирует и частично объединяет цементные частицы до крупных образований, а также обволакивает их поверхности. При этом снижаются силы межмолекулярного притяжения» [41].

«Это способствует замедлению процесса структурообразования, но обеспечивает более полное протекание процессов гидратации и образование однородной мелкокристаллической структуры. В результате адсорбции, количество воды сольватных оболочек снижается, смесь разжижается и подвижность её резко возрастает.

Отличительной особенностью действия пластификаторов является их кратковременность. Спустя 1-1,5 ч после их введения подвижность смесей резко снижается. Это обстоятельство требует укладки смеси в конструкцию или форму за промежуток времени, когда пластификатор еще оказывает свое действие» [41].

Применение химических добавок, а точнее пластификаторов, позволяет регулировать свойства бетона в достаточно широких пределах без существенного усложнения технологии производства, помогает решить многие проблемы, стоящие в настоящее время перед строительной технологией. Для того, чтобы бетонная смесь приобрела необходимые технические свойства нужно учитывать зависимости концентрации раствора пластификатора и кинетики набора прочности бетона на разных сроках твердения, и пластифицирующей способности бетонной смеси.

Пластификаторы содержат в своем составе сульфаты, из-за которых образуется дополнительное количество гидросульфатоалюмината кальция, которое имеет свойство адсорбироваться на зернах цемента, чем снижает вязкость смеси. По этой причине при введении расширяющих добавок в состав вяжущего появляется необходимость увеличения содержания пластификаторов, иначе подвижность бетонной смеси будет уменьшаться.

В экспериментах использовалась пластифицирующая добавка С-3.

Предназначается для производства:

- монолитных конструкций из бетона;
- пластичных бетонов при изготовлении сборных железобетонных конструкций;
- преднапряженных бетонов;
- водонепроницаемых бетонов;
- архитектурных бетонов.
- высокопрочных бетонов;
- вибропрессованных изделий;
- бетонов, набирающих прочность при термической обработке.

При вводе в бетонную смесь:

- снижает себестоимость бетона;
- повышает оборачиваемость опалубки;
- увеличивает стойкость бетона к химическим и климатическим воздействиям;
- препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон;
- уменьшает количество воды затворения;
- экономит расход цемента;
- увеличивает коррозионную стойкость бетона;
- позволяет получать сверхпластичные бетонные смеси с длительным сохранением подвижности;
- увеличивает раннюю и финальную прочность бетона и результате этого увеличивает долговечность.

Выводы по второй главе:

1. Установлены и описаны основные методы экспериментальных исследований.
2. Определены материалы, применяемые в экспериментальных исследованиях, и изучены их свойства.

3 Исследование свойств бетона на основе расширяющих добавок

3.1 Влияние расширяющих добавок на физико-механические свойства бетона

Самой популярной и изученной группой расширяющих компонентов являются материалы на сульфоалюминатной основе. Часть компонентов данной группы используются для создания напрягающего цемента. При приготовлении образцов для экспериментов в качестве комплексной расширяющей добавки будем использовать золу-уноса и гипсовый камень. Зола-уноса является одной из самых доступных видов алюмосодержащих добавок. Гипсовый камень ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) рассматривается в качестве сульфатного компонента комплексной расширяющей добавки. Будут применяться две комплексные расширяющие добавки с разным процентным содержанием золы уноса к гипсовому камню: 50% на 50% (в партиях 2, 3 и 4) и 60% на 40% (в партиях 5, 6, 7 и 8), соответственно. Партия 1 контрольная, без расширяющей добавки.

Для приготовления бетонной смеси использовали портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42.5Н марки ExtraCEM 500 производства ООО "Холсим (Рус)". В качестве мелкого заполнителя использовали песок Камского месторождения. В качестве крупного заполнителя использовали щебень из гранодиоритов фракцией 5-10 мм. Расход мелкого и крупного заполнителя оставался постоянным.

Во время экспериментов фиксировались прочность образцов на сжатие и показатели расширения бетона.

Смесь укладывали в формы размером 70x70x70 мм для определения прочности на сжатие, а для определения линейного расширения образцы укладывали в формы с размерами 20x20x180 мм. Твердение образцов бетона происходило при нормальных условиях. Результаты по прочности на сжатие

фиксируются после 7, 14 и 28 суток. Показатели расширения фиксируются после 7, 14, 28 и 60 суток.

Составы бетонной смеси представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Составы бетонной смеси

Состав	№ партии							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Единица измерения	кг/м ³							
Портландцемент	698	664	650	627	662	649	629	594
Песок «Камский»	794	792	793	794	791	790	793	794
Щебень 5-10 мм из гранодиоритов	437	435	436	432	433	435	434	433
Вода	313	312	315	311	313	314	315	312
Расширяющая добавка	0	35	49	70	34	48	70	105
В/В	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Осадка конуса, см	8	6,5	6	5	7	6	5	4,5

Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии представлены в таблице 3.2, а показатели расширения – в таблице 3.3.

Фотография пресса для испытаний образцов бетона на прочность при сжатии представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Пресс для испытаний образца бетона на прочность при сжатии

Таблица 3.2 – Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии

№ партии	Состав вяжущего		Прочность при сжатии, МПа		
	ПЦ	РД	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	2	3	4	5	6
1	100	0	20,9	31,7	41,6
РД (зола уноса 50% : гипсовый камень 50%)					
2	95	5	24,4	32,9	46,1
3	93	7	25,9	33,5	46,8
4	90	10	26,3	32,6	47,4

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
РД (зола уноса 60% : гипсовый камень 40%)					
5	95	5	25,8	32,3	46,5
6	93	7	27,2	34,1	48,3
7	90	10	28,7	35,9	49,1
8	85	15	27,4	33,9	47,8

Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии (таблица 3.2 и рисунок 3.2) показывают, что бетоны на основе расширяющей добавки, состоящей из 60% золы уноса и 40% гипсового камня, имеют лучшие показатели прочности. В возрасте 28 суток лучший показатель прочности имеет бетон партии 7, вяжущий компонент которого состоит из 90% ПЦ и 10% РД. Вторым результатом у партии 6, состав вяжущего 93% ПЦ и 7% РД.

Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии представлены на рисунке 3.2.

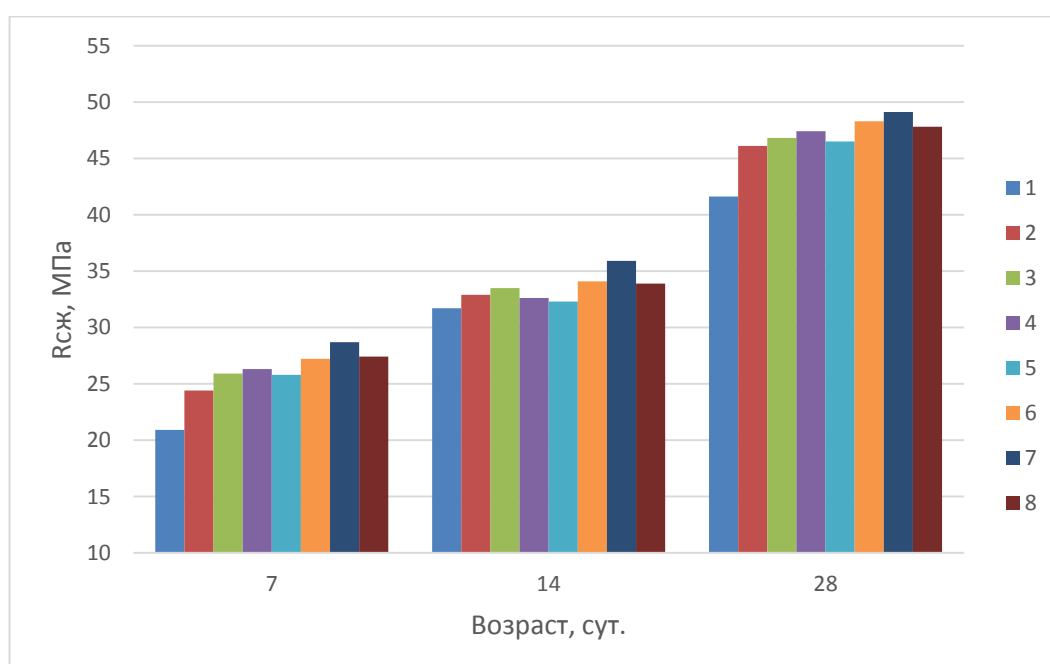


Рисунок 3.2 – Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии

Фотография установки для измерения линейного расширения бетона представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Установка для измерения линейного расширения бетона

Таблица 3.3 – Показатели расширения бетона

№ партии	Состав вяжущего		Расширение, %			
	ПЦ	РД	7 сут.	14 сут.	28 сут.	60 сут.
1	2	3	4	5	6	7
1	100	0	-	-	-	-

Продолжение 3.3

1	2	3	4	5	6	7
РД (зола уноса 50% : гипсовый камень 50%)						
2	95	5	0,01	0,02	0,025	0,015
3	93	7	0,025	0,04	0,06	0,3
4	90	10	0,04	0,06	0,07	0,05
РД (зола уноса 60% : гипсовый камень 40%)						
5	95	5	0,02	0,035	0,04	0,015
6	93	7	0,055	0,08	0,1	0,07
7	90	10	0,07	0,09	0,11	0,08
8	85	15	0,08	0,10	0,11	0,08

Показатели расширения бетонов представлены на рисунке 3.4.

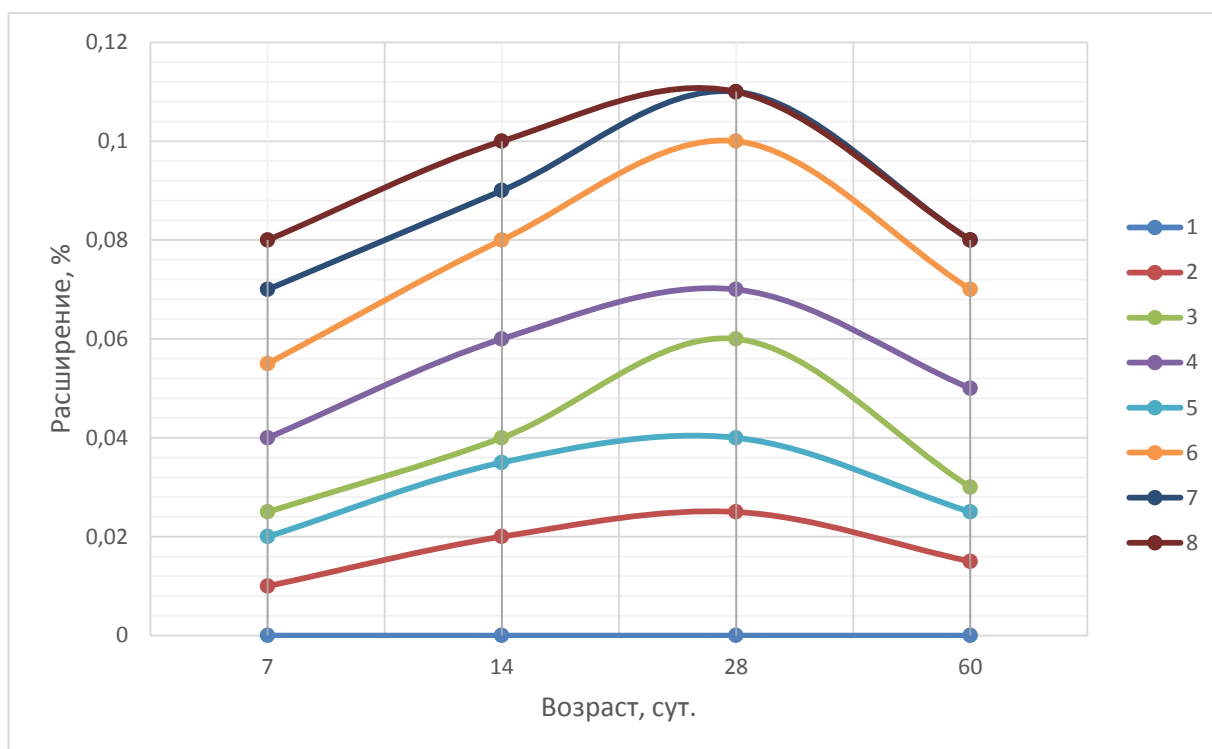


Рисунок 3.4 – Показатели расширения образцов бетона

Как видно из результатов экспериментов лучшие показатели расширения имеют бетоны на основе расширяющей добавки, состоящей из 60% золы уноса и 40% гипсового камня. Для получения бетонов с компенсированной усадкой достаточно иметь в составе вяжущего 7-10% расширяющей добавки. Как было сказано выше, при таких долях РД в составе вяжущего бетон имеет еще и лучшие показатели прочности.

На основании результатов экспериментов можно сделать вывод, что состав расширяющей добавки из 60% золы уноса и 40% гипсового камня является оптимальным. А оптимальный состав бетона у партии 7, вяжущий компонент которого состоит из 90% ПЦ и 10% РД.

3.2. Влияние пластификатора на физико-механические свойства бетонов на основе расширяющих добавок

Применение пластификаторов позволяет регулировать свойства бетона в достаточно широких пределах без существенного усложнения технологии производства, помогает решить многие проблемы, стоящие в настоящее время перед строительной технологией.

«При введении химических добавок в бетон, содержащий РД, следует учесть, что благодаря наличию в составе РД алюмосодержащего компонента сокращаются сроки схватывания и снижается подвижность бетонной смеси. Подвижность бетонной смеси, как известно, зависит от целого ряда факторов, среди которых важную роль играют температура окружающего воздуха и бетонной смеси, состав бетона.» [44].

Пластификаторы содержат в своем составе сульфаты, из-за которых образуется дополнительное количество гидросульфатоалюмината кальция, которое имеет свойство адсорбироваться на зернах цемента, чем снижает вязкость смеси. По этой причине при введении расширяющих добавок в состав вяжущего появляется необходимость увеличения содержания пластификаторов, иначе подвижность бетонной смеси будет уменьшаться.

Самым популярным пластификатором является С-3, который содержит натриевые соли – нафталин, формальдегиды и суперкислоты.

Для эксперимента как раз рассматривали пластификатор С-3. Для приготовления бетонной смеси использовали портландцемент (ПЦ) марки ExtraCEM 500 производства ООО "Холсим (Рус)". Золу-уноса и гипсовый камень использовали в качестве расширяющей добавки (РД). Процентное соотношение компонентов расширяющей добавки: 60% золы уноса и 40% гипсового камня. Расход вяжущего (ПЦ или ПЦ+РД) и заполнителей оставался постоянным при варьировании расхода пластифицирующей добавки.

Для экспериментов были выбраны различные дозировки пластификатора С-3, при которых фиксировали подвижность бетонной смеси, интенсивность нарастания прочности и показатели расширения.

Партия 9 была контрольной, в качестве вяжущего использовался ПЦ без расширяющей и пластифицирующей добавок.

Партии 10 и 11 были также на вяжущем ПЦ, но с добавлением пластификатора, в партию 2 введено 0,4% пластификатора от объема вяжущего, а в партию 3 – 0,6%.

Партии 12 и 13 были выполнены на вяжущем, который состоит из 93% ПЦ и 7% расширяющей добавки, в партию 4 введено 0,4% пластификатора от объема вяжущего, а в партию 5 – 0,6%.

Партии 14 и 15 были выполнены на вяжущем, который состоит из 90% ПЦ и 10% расширяющей добавки, в партию 6 введено 0,4% пластификатора от объема вяжущего, а в партию 7 – 0,6%.

Подвижность бетонных смесей измеряли по истечению 5, 30 и 60 минут.

Показатели подвижности бетонных смесей с применением пластификатора С-3 представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Показатели подвижности бетонных смесей с применением пластификатора С-3

№ партии	Вид вяжущего	Количество добавки С-3	Осадка конуса, см		
			5 мин.	30 мин.	60 мин.
9	ПЦ	0	8	4	0
10		0,4	14	12	9
11		0,6	20	16	14
12	93% ПЦ + 7% РД	0,4	12	10	8
13		0,6	18	15	12
14	90% ПЦ + 10% РД	0,4	10	7	4
15		0,6	17	13	11

Подвижность бетонной смеси увеличилась с П2 до П4 после добавления пластифицирующей добавки С-3 в процентном содержании 0,4% и 0,6% от объема вяжущего. Лучший пластифицирующий эффект был при использовании портландцемента без расширяющей добавки. При использовании портландцемента с расширяющей добавкой с долей в 7% и в 10% была отмечена тенденция к снижению пластифицирующего эффекта.

Темп снижения подвижности смеси показывает, что бетонная смесь на любом вяжущем с применением пластифицирующей добавки может иметь удобоукладываемость, достаточную для применения, например, в монолитном строительстве (П2 и выше).

Показатели подвижности бетонных смесей с добавлением пластифицирующей добавки С-3 можно увидеть на рисунке 3.5.

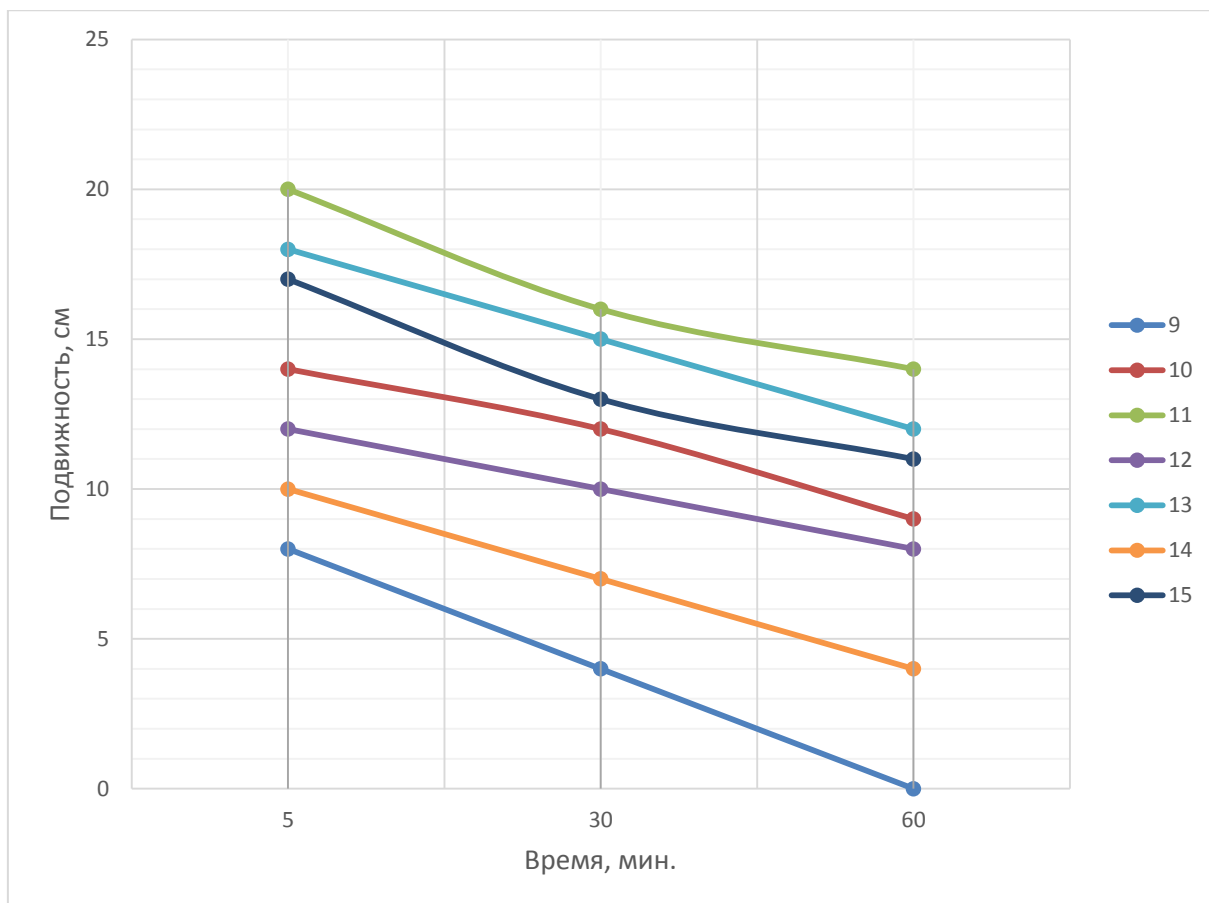


Рисунок 3.5 – Показатели подвижности бетонных смесей с добавлением пластифицирующей добавки С-3

При введении пластификатора С-3 в количестве 0,4% от объёма вяжущего (партии 10, 12 и 14), бетонные смеси по истечению 60 минут имеют следующие показатели подвижности:

- при использовании в качестве вяжущего ПЦ без добавления РД осадка конуса равна 9 см, что соответствует марке П2;
- при использовании в качестве вяжущего 93% ПЦ + 7% РД осадка конуса равна 8 см, что соответствуют марке П2;
- при использовании в качестве вяжущего 90% ПЦ + 10% РД осадка конуса 4 см, что соответствует марке П1.

При введении пластификатора С-3 в количестве 0,6% от объёма вяжущего (партии 11, 13 и 15), имеют лучшие показатели подвижности. По истечению 60 минут во всех партиях осадка конуса равна:

- при использовании в качестве вяжущего ПЦ без добавления РД осадка конуса равна 14 см, что соответствует марке по подвижности ПЗ;
- при использовании в качестве вяжущего 93% ПЦ + 7% РД осадка конуса равна 12 см, что соответствуют марке ПЗ;
- при использовании в качестве вяжущего 90% ПЦ + 10% РД осадка конуса 11 см, что соответствует марке ПЗ.

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением доли расширяющей добавки в вяжущем, действие пластификатора С-3 в количестве 0,4% от объёма вяжущего, по истечению 60 минут, сильно ослабевает.

Действие пластификатора С-3 в количестве 0,6% от объёма вяжущего, по истечению 60 минут, также ослабевает, но уже с меньшим темпом и держится на уровне марки по подвижности ПЗ.

Показатели прочности при сжатии бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3 представлены в таблице 3.4.

Введение пластификатора С-3 в вяжущие с расширяющей добавкой оказывает положительное влияние на рост прочности бетона, ощутимая разница была установлена в образцах с возрастом 7 суток.

Таблица 3.4 – Показатели прочности при сжатии бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3

№ партии	Вид вяжущего	Количество добавки С-3	Прочность при сжатии, МПа		
			7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	2	3	4	5	6
9	ПЦ	0	20,9	31,7	41,6
10		0,4	18,6	33,5	44,1
11		0,6	19,2	33,9	45,3

Продолжение таблицы 3.4

12	93% ПЦ + 7% РД	0,4	26,3	35,6	50,3
13		0,6	25,5	36,4	51,2
14	90% ПЦ + 10% РД	0,4	27,1	35,7	52,4
15		0,6	27,8	36,9	52,9

Показатели прочности при сжатии бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3 можно увидеть на рисунке 3.6.

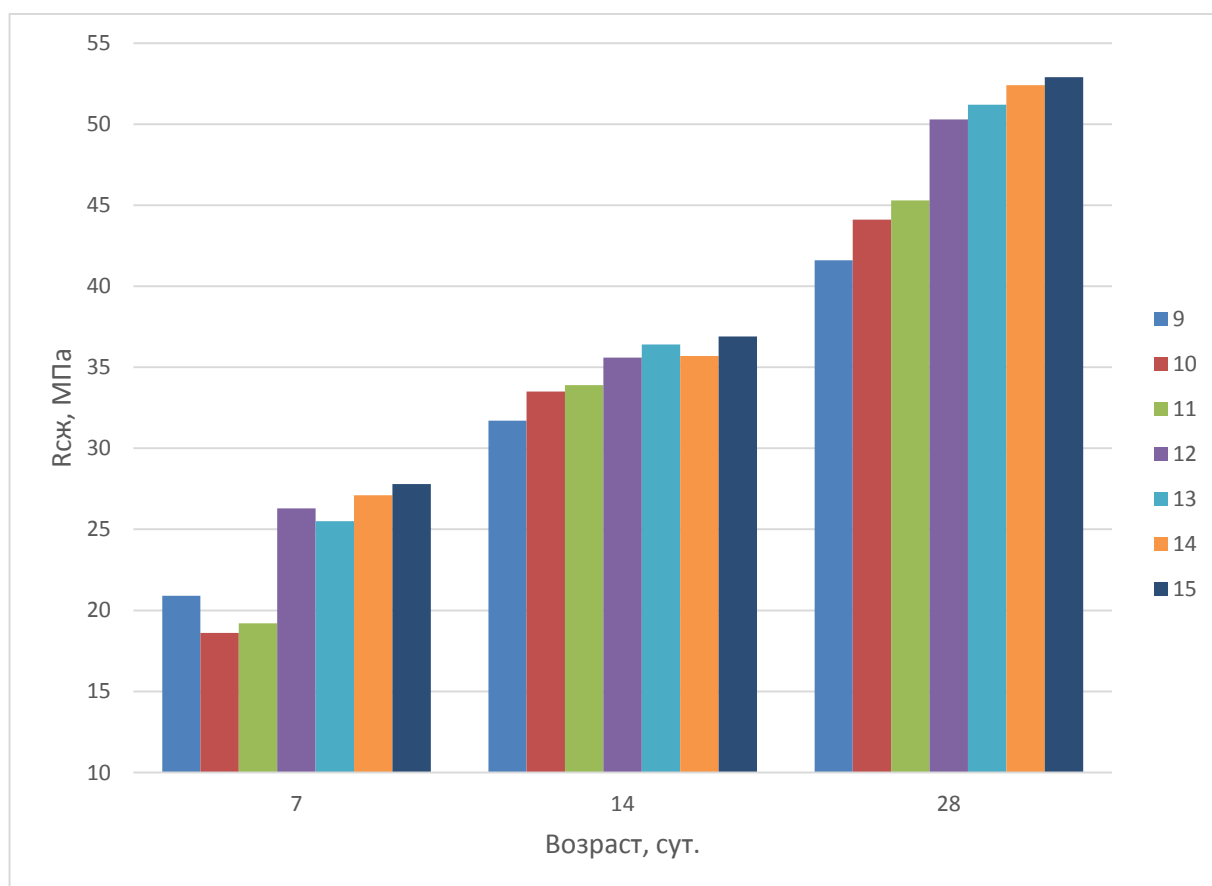


Рисунок 3.6 – Показатели прочности при сжатии бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3

С использованием пластифицирующей добавки С-3 показатели прочности на сжатие бетонов с расширяющей добавкой в возрасте 28 суток

были на 4-7% лучше, чем показатели таких же бетонов без добавления пластификатора.

Показатели расширения бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3 представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Показатели расширения бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3

№ партии	Вид вяжущего	Количество добавки С-3	Расширение, %			
			7 сут.	14 сут.	28 сут.	60 сут.
9	ПЦ	0	-	-	-	-
10		0,4	-	-	-	-
11		0,6	-	-	-	-
12	93% ПЦ + 7% РД	0,4	0,04	0,07	0,08	0,05
13		0,6	0,035	0,06	0,07	0,04
14	90% ПЦ + 10% РД	0,4	0,06	0,09	0,10	0,07
15		0,6	0,05	0,075	0,09	0,06

Показатели расширения бетонов на вяжущих 93% ПЦ + 7% РД и 90% ПЦ + 10% РД при введении пластификатора в количестве 0,4% были на 15-20% больше, чем при введении пластификатора в количестве 0,6%.

Можно сделать вывод, что процесс расширения протекает с большей эффективностью при добавлении пластифицирующей добавки С-3 в количестве 0,4% от вяжущего.

Показатели расширения бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3 можно увидеть на рисунке 3.7.

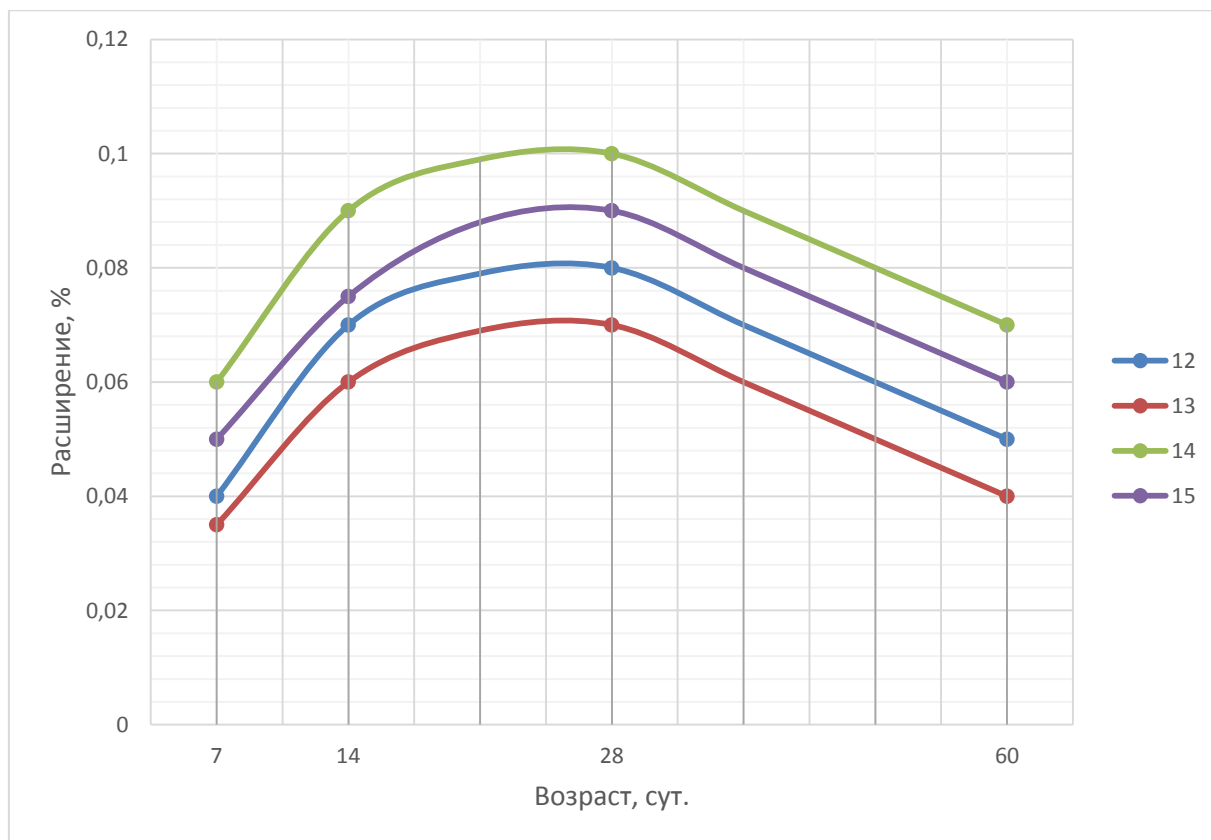


Рисунок 3.7 – Показатели расширения бетонов с применением пластифицирующей добавки С-3

Выводы по третьей главе:

1. На основании результатов исследований определен оптимальный состав комплексной расширяющей добавки.
2. Проведены исследования влияния пластифицирующей добавки на бетоны на основе расширяющей добавки.
3. В результате экспериментов определен оптимальный состав бетона на основе расширяющих добавок.

Заключение

Из результатов проведенных экспериментальных исследований следует сделать следующие выводы:

1. Проанализировав результаты экспериментальных исследований определен оптимальный состав комплексной расширяющей добавки: 60% золы уноса к 40% гипсового камня.

Определив оптимальный состав расширяющей добавки, выбран наиболее оптимальный состав бетонной смеси. Лучшие показатели по прочности на сжатие и по расширению были у образца партии №7, который был на вяжущем из 90% портландцемента и 10% расширяющей добавки.

Проведенные эксперименты показали, что благодаря использованию в составе вяжущего компонента расширяющей добавки повышаются физико-механические показатели бетона. Значительно увеличиваются показатели бетона по прочности на сжатие, а также появляется линейное расширение, благодаря которому бетон гораздо меньше подвержен усадке.

2. Произведен экспериментальный анализ влияния пластифицирующей добавки С-3 на физико-механические свойства бетона на основе расширяющей добавки.

Показатели подвижности бетонной смеси увеличились с П2 до П4. Показатели расширения бетонов, в составе вяжущего компонента которых была расширяющая добавка при введении пластификатора в количестве 0,4% были на 15-20% больше, чем при введении пластификатора С-3 в количестве 0,6% от объема вяжущего. Показатель прочности на сжатие оказался лучше при введении пластификатора С-3 в количестве 0,6% от объема вяжущего.

Применение расширяющих добавок обеспечивает конструкции долговечность и трещиностойкость. Бетон, изготовленный на портландцементе с использованием расширяющей добавки, имеет высокие физико-механические характеристики.

Список используемых источников

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
2. Бутт Ю.М., Тимашёв В.В. Портландцемент (минералогические и гранулометрические составы, процессы модифицирования и гидратации). М.: Сройиздат, 1974. 328 с.
3. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М., Стройиздат, 1990. 356 с.
4. Брыков, А.С. Гидратация портландцемента: учеб. пособие. С-Петербург. / А.С. Брыков. - М.: СПбГТИ(ТУ), 2008. 32 с.
5. ГОСТ 8.207-76 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
6. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
7. ГОСТ 31424-2010 Материалы строительные нерудные из отсеков дробления плотных горных пород при производстве щебня.
8. ГОСТ 7473-2010 Смеси бетонные. Технические условия.
9. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
10. ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования
11. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний.
12. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия.
13. ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

14. ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ Методы физико-механических испытаний».
15. ГОСТ 27006-86. «Бетоны. Правила подбора состава».
16. ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».
17. ГОСТ 12730.0-78 «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости».
18. ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».
19. ГОСТ 32803-2014 «Бетоны напрягающие. Технические условия»
20. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. Введ. 1987-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
21. ГОСТ 31357-2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия. Введ. 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2008. 13 с.
22. Гринёв А.П. Мелкозернистые бетоны для монолитного строительства на основе сырья Ханты-Мансийского автономного округа: автореф. дис. . канд. техн. наук / Анатолий Петрович Гринёв. Белгород, 2011. - 26 с.
23. Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Особенности производства ВНВ и бетона на его основе с использованием техногенного полиминерального песка // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 1. С. 36-37.
24. Звездов А.И., Мартиросов Г.М. Бетоны с компенсирующей усадкой // Бетон и железобетон, № 3, 1995
25. Иванов Ф.М., Батраков В.Г., Москвин В.М., Розенталь Н.К., Фаликман В.Р. Классификация пластифицирующих добавок по эффекту их действия // Бетон и железобетон. 1981. № 4. С. 33.

26. Корнеев В.И. Сухие строительные смеси: первое приближение Электронный ресурс. // Novomix Завод Сухих Смесей Рекомендации - Новосибирск, 2009. URL: http://www.novomix.ru/NX_1/recomendaron/doc8/Rek8.htm.

27. Корнеев В.И. Производство сухих строительных смесей новая отрасль строительной индустрии Электронный ресурс. // Журнал «ВесьБетон». 20.07.2008. URL: <http://www.allbeton.ru/article/174/22.html>.

28. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учеб. справочное пособие. Ростов н/Д.: Феникс, 2005. 221 с.

29. Красновский Б.М., Долгополов Н.Н., Загреков В.В., Суханов М.А., Лореттова Р.Н. Твердение бетонов на ВНВ при отрицательных температурах // Бетон и железобетон. Избранные статьи. 1991. № 2. С. 17-18.

30. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: автореф. дис. . доктор техн. наук / Лесовик Руслан Валерьевич. Белгород, 2009. - 41 с.

31. Молчанов В.И., Селезнёва О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.

32. Медведева И.Н. О формировании ранней прочности цементного камня // Сухие строительные смеси. 2007. № 1. С. 56-58.

33. Модифицирующие добавки к сухим строительным смесям // Сухие строительные смеси. 2009. №5-6. С. 38-39.

34. Одинокий М.И. Оборудование для производства сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2007. № 2. С.41^43

35. Погорелова И.А. Сухие строительные смеси для неавтоклавных ячеистых бетонов: диссертация. кандидата технических наук / Погорелова Инна Александровна. Белгород, 2009. - 195 с.

36. Попельнюхов С.Н., Железняк А.Р., Шубин К.С., Передреев М.А. Преимущества и особенности механоактивации сырьевых материалов при производстве сухих строительных смесей // АЛИТинформ. 2011. № 4. С. 72-

37. Рамачандран В.С. под. ред. А.С. Болдырева, пер. с англ. Добавки в бетон: справочное пособие. М.: Стройиздат, 1988. 570 с.
38. Рапопорт А.В., Рапопорт Н.В., Кочетков А.В., Васильев Ю.Э., Каменев В.В. Проблемы долговечности цементных бетонов // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 38-40.
39. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минрегион России. 2013. - 175с.
40. Свод правил по проектированию и строительству. Приготовление и применение растворов строительных (СП 82-101-98). Введ. 15.07.1998. М., 2004. 24 с.
41. Султанов А.В., Шентяпин А.А. Вяжущие композиции на основе портландцемента для получения из сухих строительных смесей растворов с компенсированной усадкой // Сухие строительные смеси. 2008. № 1. С. 3—5.
42. Сорокин В. Ценные свойства вяжущих низкой водопотребности // газета «Строительная газета». № 11. 2005 г. режим доступа: <http://www.masterbetonov.rU/content/view/610/239>.
43. Титов М.Ю., Бетоны с компенсированной усадкой на основе расширяющих добавок. Диссертация канд., Москва, 2012. – 181 с.
44. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бардаханов С.П. Бетон повышенной прочности на композиционном вяжущем // Строительные материалы. 2012. №3. С. 23-25.
45. Урханова Л.А., Балханова Е.Д. Получение композиционных алюмо-силикатных вяжущих на основе вулканических пород // Строительные материалы. 2006. №5. С. 51-53.
46. Усов Б.А., Попов Н.Л., Аликина И.Б. Технология сухих строительных смесей на кварцсодержащих цементах с химическими добавками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. №4. С. 56-58.

47. Урецкая Е.А., Батыновский Э.И. Сухие строительные смеси: материалы и технологии: научн.-практ. пособие. Минск: НПООО «Стринко», 2001. 208 с.

48. Череватова А.В., Жерновский И.В., Строкова В.В. Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технология и перспективы применения. LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrücken. 2011. 170 с.

49. Чернышов, Е.М., Потамошнева, Н.Д. Развитие исследований по проблемам структурообразования цементного камня / Е.М. Чернышов, Н.Д. Потамошнева // Актуальные проблемы строительного материаловедения: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. 1998. №1. С. 4-7.

50. Шишканова В.Н., Джафарли А.Ш. Процессы трещинообразования и повышение долговечности конструкций [Электронный ресурс] / В.Н. Шишканова, А.Ш. Джафарли // Международная научно – практическая конференция «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2019. – URL: http://mnic-penza.ru/inform/conf/sb_mk-44-19-2.pdf.

51. Шишканова В.Н., Джафарли А.Ш. Эффективность применения расширяющих добавок для бетонных конструкций / В.Н. Шишканова, А.Ш. Джафарли // IX Международная научно – практическая конференция «Организационно-экономические и инновационно-технологические проблемы модернизации экономики России». – 2020.

52. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии (избранные главы). Л.: «Наука», 1977. 291 с.

53. Abramovich, L.A. The efficiency potential of organizational, technological and managerial solutions for non-destructive quality control methods in the construction of monolithic reinforced concrete structures [text] / L.A. Abramovich, B.T. Khasanbievich // International journal of applied engineering research. – 2016. – pp 90 – 111.

54. Ahuja H.N. et al. Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Project. 2-nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. – pp 140 – 145.

55. Artelt C. Impact of superplasticizer concentration and ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions / C. Artelt, E. Garcia // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38, No 5. – P. 633-642.

56. Azuma K., Nakamura T., Masue H., Umeharo H. Cement Seine and Concrete Technology № 57, 2003, 200-206.

57. Joseph J.Waddell, Joseph A. Dobrowolski, «Concrete Construction Handbook», 2011. – pp 95 – 101.