

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)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оценка влияния сульфата алюминия на прочность бетона

Обучающийся

Е.А. Гулькова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд. техн. наук, доцент, В.Н. Шишканова

руководитель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Теоретические аспекты влияния сульфата алюминия на прочность бетона.....	8
1.1 Основные сведения о бетонах с добавками	8
1.2 Значение сульфата алюминия в качестве добавки в бетоне.....	12
1.2.2 Влияние сульфата алюминия на гидратацию портландцемента.....	16
1.2.3 Сульфатная коррозия бетона	17
2 Характеристики используемых материалов и методики испытаний	23
2.1 Материалы, используемые в исследованиях.....	23
2.1.1 Портландцемент.....	23
2.1.2 Мелкий заполнитель.....	25
2.1.3 Крупный заполнитель.....	27
2.1.4 Сульфат алюминия	29
2.1.5 Суперпластификатор	34
2.1.6 Ускоритель твердения	37
2.2 Методы экспериментальных исследований.....	39
2.2.1 Песок	39
2.2.2 Щебень	41
2.2.3 Подбор состава бетонной смеси.....	42
2.2.4 Определение подвижности бетонной смеси.....	42
2.2.5 Определение нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания.....	44
2.2.6 Определение предела прочности	47
3 Оценка результатов проведенных испытаний	50
3.1 Эффективность сернокислого алюминия в качестве ускорителя схватывания	50
3.2 Влияние добавки сернокислого алюминия на прочность	

бетона.....	55
Заключение	64
Список используемой литературы и используемых источников.....	66

Введение

В настоящее время строительство зданий и сооружений промышленного и гражданского значения занимает ведущую роль в развитии государства, а также в расширении масштабов городов. С каждым годом все быстрее увеличиваются темпы строительства. То или иное здание или сооружение состоит из отдельных конструкций (железобетонных балок, плит перекрытия, железобетонных колонн и т.д.). Одним из основополагающих материалов для изготовления конструкций, помимо металла (арматуры), является бетон. На данный момент бетон и его применение в строительстве занимает одну из ведущих позиций в изучении и исследовании строительных материалов.

Бетон – прочный и долговечный материал, который за счет своей универсальности позволяет использовать его в широкой области применения. В основном бетон используют для возведения фундаментов, изготовления несущих и ограждающих железобетонных конструкций здания. За счет своих физико-механических характеристик бетон способен воспринимать высокие нагрузки, при этом сопротивляясь растрескиванию или разрушению.

В последнее года становятся наиболее заметны значительные достижения в области исследования добавок для увеличения прочности бетона, за счет применения химических и минеральных материалов. При этом используемые минеральные или химические добавки влияют и на ускорение твердения материала. Существует огромное количество добавок и присадок в бетон, которые непосредственно влияют на состав и характеристики бетонной смеси. Но не все из изученных ранее добавок положительно влияют на бетон.

При высокой концентрации добавок в составе бетонной смеси прочностные характеристики материала могут значительно упасть в показателях. Тем самым добавки, способные улучшать физико-механические показатели материала, могут привести к ухудшению качества бетона вплоть до потери прочности с последующим разрушением.

Актуальность работы. Проблема выбора эффективной добавки для твердения бетона является одним из важнейших вопросов. Ведь от совместимости бетона и добавки зависят прочностные характеристики полученной смеси, а в последующем и конструкции в целом.

В настоящее время в составах бетона в качестве ускорителя твердения используется большое количество добавок. К ним относятся такие добавки как хлорид кальция, сульфат натрия, Sika, Basf, Ceresit, и др.

При выборе ускорителя твердения в первую очередь учитывается негативное влияние добавок на бетон (коррозия бетона и арматуры, разрушение поверхности бетонной конструкции, вплоть до оголения арматуры). Например, хлориды кальция, также как и сульфат натрия, коррозионно влияют на бетон, поэтому их количество в составе железобетона ограничивается малым процентом добавки относительно массы цемента.

Сульфат алюминия один из самых известных материалов для применения его в строительстве. По сравнению с другими он является одним из самых доступных.

Цель магистерской диссертации направлена на исследование влияния сульфата алюминия на прочность бетона в качестве добавки, как ускорителя твердения.

Гипотеза исследования:

- если в определенных процентах использовать сульфат алюминия как ускоритель твердения в бетон, то можно добиться увеличения прочностных характеристик бетона, сократив тем самым срок схватывания цементного теста.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ проблемы и изучить литературу о использовании сульфата алюминия в бетонах, его физико-механических свойствах;
2. Произвести подбор составляющих бетонной смеси для выполнения требуемых исследований с изучением основных характеристик используемых материалов;

3. Провести анализ результатов проведенных испытаний и дать оценку влияния сульфата алюминия на прочность бетона и сроки схватывания.

Предметом исследования является исследование в области влияния сульфата алюминия на прочность бетона.

Объектом исследования является сульфат алюминия, используемый в качестве добавки.

Методы исследования: анализ и эксперимент.

В работе используется статистическая обработка данных для дальнейшей оценки влияния объекта исследования на основные физико-механические характеристики бетона, путем сравнения показателей между изготовленными бетонными образцами.

Научная новизна исследования:

- теоретически и экспериментально обоснованное влияние сульфата алюминия, используемого в качестве добавки, на основные физико-механические характеристики;
- выявление влияния добавки сульфата алюминия на сроки схватывания цементного теста, а также на нормальную плотность;
- определено соотношение оптимального количества добавки сульфата алюминия по отношению к массе цемента, для увеличения прочностных характеристик.

Практическая значимость состоит в изучении влияния сульфата алюминия на прочностные характеристики бетонной смеси, сроки схватывания и нормальную плотность цементного теста, в том числе с добавками.

Личное участие автора – изучение методов повышения прочности материала, изучение влияния сульфата алюминия на сроки схватывания цементной смеси, проведение экспериментальных исследований и последующая обработка полученных результатов.

Апробация результатов исследования. Результаты работы (1 статья) опубликована в научном журнале «Вестник науки».

На защиту выносятся:

- теоретические аспекты влияния современной химической добавки сульфата алюминия на прочность бетона, с учетом использования исследуемого материала в разных сферах деятельности;
- подбор состава бетонной смеси с учетом выбранных материалов, а также изучение из физико-механических и химических характеристик.
- влияние добавки сульфата алюминия на сроки схватывания и густоту цементного теста.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из 70 страниц машинописного текста включающие в себя: введение, 3 главы, заключение, содержит 31 рисунок, 11 таблиц и список используемой литературы.

1 Теоретические аспекты влияния сульфата алюминия на прочность бетона

1.1 Основные сведения о бетонах с добавками

С течением времени все больше увеличиваются темпы строительства как в жилом, так и промышленном масштабе, соответственно увеличиваются и объемы требуемых материалов на возведение того или иного объекта строительства. В зависимости от масштабов конструкций требуются и соответствующие требования к используемым материалам, такие как повышенная прочность, долговечность, способность противостоять факторам внешней среды.

Одним из ключевых материалов, используемым в большинстве конструкций является бетон. Бетон используется в строительстве как материал для изготовления железобетонных конструкций, фундаментов зданий и сооружений, а также растворов. Бетон является одним из самых прочных материалов, исходя из своих физико-механических характеристик.

«Бетон - это искусственный каменный строительный материал, получаемый в результате формования и затвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотнённой смеси из минерального (чаще всего это портландцемент) или органического вяжущего вещества, крупного или мелкого заполнителей, воды» [11].

Согласно ГОСТ 26633-2015 «Классы бетона по прочности, марки по морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости устанавливают в соответствии с нормами проектирования и указывают в проектной и технологической документации, стандартах и технических условиях на изделия и конструкции. Виды бетонов по темпам набора прочности устанавливают в соответствии с ГОСТ 25192» [11].

На рисунке 1 представлены образцы бетона разных марок.



Рисунок 1 – Бетонные образцы разных марок.

Одним из важных факторов для оценки бетона являются его физико-механические свойства. К данным свойствам относят такие показатели как:

- прочность (на осевое сжатие, на растяжение при изгибе, на сжатие) – свойство материала воспринимать нагрузки от вышележащих конструкций (металлических или железобетонных) не подвергаясь растрескиванию;
- морозостойкость – свойство материала выдерживать определенное количество циклов оттаивания и замораживания в условиях окружающей среды без видимых разрушающих показателей;
- водонепроницаемость – свойство материала сохранять устойчивость от воздействия воды из окружающей среды на поглощении ее вглубь материала.

Согласно ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» «В зависимости от условий работы бетона в различных средах эксплуатации по ГОСТ 31384 допускается устанавливать дополнительные требования к бетону по нормируемым показателям качества по ГОСТ 4.212» [11].

Также согласно ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности» «Контроль и оценку прочности бетона на предприятиях и в организациях, производящих бетонные смеси, сборные, сборно-монолитные и монолитные бетонные и железобетонные конструкции и изделия, следует

проводить статистическими методами с учетом характеристик однородности бетона по прочности» [12].

Помимо основных показателей у бетона есть еще одна важная характеристика, от которой зависит напрямую прочность бетона – водоцементное отношение (В/Ц). Водоцементное отношение (В/Ц) – это отношение массы материала к количеству воды. Чем меньше водоцементное соотношение, тем быстрее бетон наберет раннюю прочность, но при этом после 28 дней он будет медленнее набирать прочность и поверхность будет труднее обрабатывать для дальнейших работ. Чем водоцементное соотношение больше, тем медленнее бетон наберет раннюю прочность, но быстрее наберет дополнительную.

Наиболее популярными в строительстве являются бетоны с использованием добавок.

В соответствии с ГОСТ 24211-2018 «Добавки для бетонов и строительных растворов» «Добавки могут выпускаться в виде жидких (водные растворы, эмульсии, суспензии), сыпучих (водорастворимые, водонерастворимые), пастообразных продуктов и в виде монолит-глыбы» [18].

В последние десятилетия наблюдаются значительные достижения в создании бетонов нового поколения с высокими показателями технологичности, прочности, плотности, значительного снижения водоцементного отношения, за счет применения высокоэффективных химических и минеральных добавок регулирования составов, структуры и свойств бетонной смеси.

«Сочетание суперпластифицирующих добавок с ускорителями или замедлителями гидратации – реальный путь регулирования свойств товарного бетона в зимних или летних климатических условиях.» [36].

На рисунке 2 представлен метод формирования составов комплексных добавок.

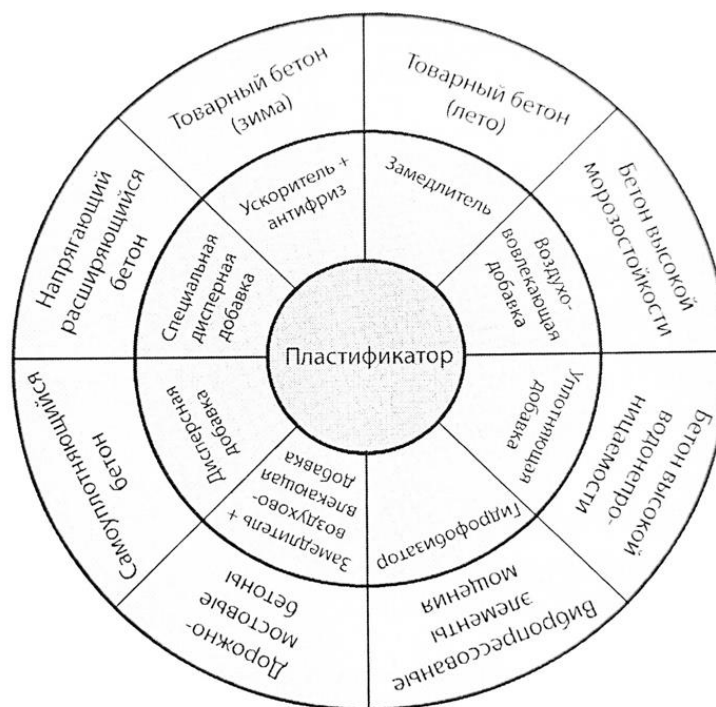


Рисунок 2 – Диаграмма формирования составов комплексных добавок

Но несмотря на значительные достижения в области бетонирования и технологии бетонов имеется ряд нерешенных задач и проблем.

«Наиболее существенно, с позиции обеспечения эффективности, проблема совместимости компонентов, особенно цемента с добавками» [36].

При подборе состава бетонной смеси очень важно обосновать совместимость и эффективность введения любых добавок на стадии их выбора с использованным в составе бетоном.

«Понятие «совместимость» имеет общечеловеческое и философское звучание. Оно означает взаимное соответствие, сочетаемость, существование в гармонии. В нашем случае – это способность добавки при взаимодействии с цементом и другими компонентами обеспечивать и поддерживать требуемые свойства бетонных смесей и твердеющего бетона на должном уровне в течение определенного времени. А, в общем, совместимость – есть основная функция эффективности добавки, оценивать которую корректно и количественно еще не научились» [36].

1.2 Значение сульфата алюминия в качестве добавки в бетоне

1.2.1 Роль сульфата алюминия в бетоне

Как в промышленном, так и жилом строительстве большая часть конструкций является железобетоном, так как он является одним из прочных материалов, при этом удобным для работы. Бетонные конструкции могут принимать любые типоразмеры, за счет своей удобоукладываемости в заготовленные формы. Основой строительных работ является устройство конструкций фундаментов, стен, перекрытий и т.д. Рассмотрим в дальнейшем сульфат алюминия и его физико-механические и химические параметры.

Сульфат алюминия является уникальной добавкой, так как используется во множестве сфер.

«Сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) - может использоваться в бетоне как реагент для ускорения твердения. Он способствует образованию дополнительных гидратных фаз, что улучшает структуры бетона. Однако важно учитывать, что избыток сульфата алюминия может негативно сказаться на долговечности бетона, вызывая коррозию арматуры и усадочные трещины. Поэтому его добавление должно быть строго рассчитано» [15].

Одним из применений сульфата алюминия является использование добавки в торкрет-бетонах.

«Торкрет-бетон – это бетон, который наносится на поверхность методом распыления (торкретирования) под давлением сжатого воздуха» [2].

Торкретирование – это процесс, использующийся в строительстве, при котором бетонная смесь подается под давлением в заготовленное место (поддон, чашу и т.д.). При данной методике использование сульфата алюминия в составе бетонной смеси необходимо, так как требуется обеспечить качественное торкретирование. «Особенностью добавок ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетонов является моментальное схватывание или «flash setting», которое в свою очередь исключает сползание смеси с поверхности.

Процесс торкретирования приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Процесс торкретирования.

Соединения, заявленные в составах ускорителей, представляют собой сульфаты и гидроксиды алюминия, сильно ускоряющие данный процесс нанесения. Скорость схватывания в зависимости от дозировки алюминия может сократиться от 2 до 30 раз, при этом наибольшей продуктивностью обладает гидроксид алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ [2].

При использовании данного метода нанесения, сульфат алюминия входящий в состав смеси, не влияет на основные прочностные характеристики смеси, тем самым позволяя более качественно выполнять процесс бетонирования.

Также одним из вариантов использования сульфата алюминия в строительстве является защита твердеющего бетона. Данный метод защиты осуществляется непосредственно нанесением раствора сульфата на поверхность свежееуложенного бетона посредством напыления.

Рассматриваемый способ нанесения состава на поверхность бетона

позволяет выполнить более качественный уход, вне зависимости от конфигурации и расположения обрабатываемой конструкции. Такой вариант защиты поверхности обеспечивает быстрый процесс схватывания цемента в верхних слоях, при этом не ухудшая сцепления между «старым» и «новым» слоями бетона, в отличие от гидрофобизирующих веществ, по сравнению с использованием пленкообразующих составов.

После растворения в воде сульфат алюминия будет использоваться в качестве гидроизоляции фундаментов, цоколей. Внедрение многочисленных добавок способствует увеличению водонепроницаемости бетона. Плотность материала увеличивается посредством применения процесса трамбования, проведения вакуумирования или центрифугирования.

При очистке технической воды также используется сульфат алюминия в качестве коагулянта. Коагулянты – химические вещества, используемые для соединения частиц, загрязняющих воду, создавая более крупные частицы, с последующим выведением их из состава воды.

Коллоидные частицы в загрязненной технической воде отрицательно заряжены.

«За счет «налипания» ионов с положительным зарядом компоненты-загрязнители имеют двойную электрическую «оболочку», что приводит к их взаимному отталкиванию. Соответственно, из-за малой удельной массы частички не оседают, загрязняя толщу воды» [4].

На рисунке 4 можно увидеть процесс реакции налипания загрязняющих частиц и формирование в более крупную частицу.



Рисунок 4 – Воздействие сульфата алюминия

«При взаимодействии сульфата с водой в ионах начинается процесс нейтрализации электростатического заряда, что в свою очередь вызывает образование частиц вокруг коагулянта, при этом образуя крупные и достаточно «тяжелые» для оседания фракции» [16].

Сульфат алюминия обладает определенными физическими характеристиками. При добавлении его в состав раствора будет необходимо интенсивное перемешивание полученной бетонной смеси, так как сульфат алюминия в материале вызывает ускоренной водопоглощение.

«Гипотетическая опасность сульфата алюминия может состоять в остаточном содержании коагулянта в очищенной жидкости» [16].

В определенных объемах сульфат алюминия может повысить устойчивость бетона к агрессивным средам. Касается это непосредственно коррозионных процессов, протекающих со временем в конструкции.

В отличии от всех вышеперечисленных качеств сульфата при его использовании есть положительные и отрицательные стороны. В больших количествах сульфат алюминия может оказывать негативное влияние на

коррозионную стойкость материала, а также на прочность вызывая разрушение конструкции.

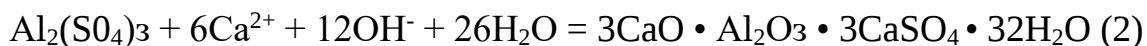
«Важно отметить, что сульфаты могут вызывать коррозию бетона, особенно в условиях высокой влажности и агрессивной среды. Это может привести к ухудшению прочности и долговечности бетона. Сульфаты могут негативно влиять на морозостойкость бетона, что особенно важно для конструкций, подвергающихся циклам замораживания и оттаивания» [9].

При соблюдении определенных дозировок добавление сульфата алюминия в состав бетонной смеси может быть полезным.

Рекомендуется проводить тестирование на производственных пробах для оценки всех возможных воздействий на характеристики конечного продукта.

1.2.2. Влияние сульфата алюминия на гидратацию портландцемента

Сульфат алюминия при добавлении в раствор влияет на ускорение процесса твердения цементного теста и обусловлен участием сульфата алюминия в интенсивном образовании высокосульфатного гидросульфоалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (этtringита); другие составляющие для формирования структуры этtringита появляются в жидкой фазе сразу после затворения цемента водой в результате гидролиза силикатных фаз:



«Таким образом можно сделать вывод, что быстрое образование этtringита в составе бетонной смеси в ранний период гидратации способствует схватыванию цементного теста. Чем больше сульфата алюминия добавлено в состав, тем больше образуется этtringита, соответственно быстрее наступит схватывание» [13].

«В работе начало и конец схватывания цементного теста ($\text{в/ц}=0.4$), содержащего $> 9 \text{ \%масс.}$ 18-водного сульфата алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$),

составляют соответственно менее 10 и 20 мин, при том, что значения начала и конца схватывания для бездобавочного теста составляют 230 и 310 мин (определение проводилось в соответствии со стандартными методиками)» [21].

«Как отмечалось выше, к примеру, при торкретировании, эффективность использования смеси выше, чем при ее ручном замесе. В первом случае ускоритель распределяется в бетонной смеси более равномерно, в то время как при ручном приготовлении быстрая потеря подвижности смеси создает помехи для тщательного перемешивания» [22].

«Процессы, происходящие при участии сульфата алюминия, оказывают влияние на гидратацию фаз, входящих в состав портландцемента. Особенности этого влияния зависят от дозировки сульфата алюминия, а также от способа изготовления бетона (ручная укладка или торкретирование).

При небольших дозировках (~ 0.5 %масс. в пересчете на Al_2O_3) сульфат алюминия ускоряет гидратацию силикатных фаз цемента и фазы C_3A , что в совокупности со структурирующим действием этtringита способствует повышению прочности цементного камня по сравнению с прочностью контрольного бездобавочного камня» [14].

В высоких дозировках сульфат алюминий способствует быстрому схватыванию (~ 1.5 %масс. в пересчете на Al_2O_3), в то же время замедляет гидратацию цемента.

«Следствием замедления гидратации цемента в присутствии высокого содержания алюмосульфатного ускорителя является отставание роста прочности в позднем возрасте по сравнению с бездобавочным цементом. При этом ранняя прочность (1 сут) остается выше контрольной, но ниже прочности камня с более низкими дозировками ускорителя» [26].

1.2.3. Сульфатная коррозия бетона

Коррозия материала – это процесс разрушения поверхности за счет влияния на нее химических процессов. Коррозия может привести к

разрушению той или иной конструкции, что скажется на устойчивости, прочностных характеристиках материала, а в последствии приведет к травмам или гибели людей при обрушении конструкций.

Сульфатная коррозия – один из видов коррозии, при которой, разрушение происходит за счет влияния на конструкции сульфатов. Особенностью сульфатной коррозии является наличие фазового перехода элементов химической реакции, а в отдельных случаях и исходного раствора в твердую фазу вследствие кристаллизации.

Сульфатной коррозии может быть подвержен, бетон эксплуатирующийся в различных условиях.

«Сульфаты имеют сложный механизм воздействия на активный в химическом отношении компонент бетона – цементный камень. Коррозионное воздействие может усиливаться или ослабевать в зависимости от концентрации агрессивных компонентов, при переменном уровне воздействия растворов солей на бетон конструкции, периодически высушивании, частичном погружении» [24].

Сущность сульфатной коррозии состоит в том, что содержащиеся в бетоне элементы вступают в химическую реакцию с сульфат-ионами, что в свою очередь приводит к постепенному разрушению структуры бетона и ведет к потере его прочности.

Коррозия вызывает возникновение трещин в бетонных конструкциях посредством разбухания и искривления конструктивных элементов.

На рисунке 5 можем увидеть результат сульфатной коррозии на поверхности бетона.



Рисунок 5 – Сульфатная коррозия

Сульфатная коррозия может быть определенных видов. Одним из видов является проявление в виде сульфатоалюминатной коррозии. При наличии данной коррозии сульфаты взаимодействуют с гидроалюминатом кальция, когда при обычной сульфатной коррозии элементы сульфатов взаимодействуют с другими компонентами бетона.

Помимо влияния того, как коррозия разрушает поверхность бетона, она не агрессивна к арматурным конструкциям.

«Сульфатная коррозия — это форма коррозии, обусловленная воздействием сульфатных ионов (SO_4^{2-}) на строительные материалы, такие как бетон и металл. Это явление особенно актуально в условиях агрессивных сред, где сульфаты присутствуют, например, в грунтовых водах, сточных водах или в атмосферных осадках» [6].

Сильное влияние на стойкость и прочность бетона оказывает гидросульфатоалюминат кальция или по-другому этtringит. Материал также не имеет цвета, как и сульфат алюминия.

При образовании этtringита сульфаты будут входить в реакцию с гидросульфоалюминатами кальция, что в последствии приведет к более высокой стойкости материала.

«В зависимости от условий может образовываться две формы гидросульфоалюмината:

трехсульфатный - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$;

моносulfатный - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [25].

Сульфатную коррозию можно определить по внешним признакам. Для плотных бетонов сульфатная коррозия выглядит как поверхностное шелушение, отслоение. Для неплотных бетонов коррозия вызывает трещины по всему объему конструкции, заметна и деформация конструкции.

«В процессе эксплуатации бетонной конструкции могут создаваться условия, благоприятные для кристаллизации вторичного этtringита (высококальциевого гидросульфоалюмината) в теле бетона. Образование этtringита в крупных порах и пустотах не представляет опасности» [1].

«Для того, чтобы образовался этtringит необходимы определенные условия, например, поступление сульфат-ионов в тело бетона с грунтовыми водами, стоками и т.д. Также благоприятными условиями для этtringита будет наличие в бетоне большого количества алюмо- и серосодержащих компонентов (в составе цемента, заполнителей, минеральных и химических добавок). Такой вид деструктивных процессов в бетонных конструкциях имеет широкое распространение и известен, как сульфатная коррозия» [2].

«При использовании алюмосульфатных ускорителей в бетонную смесь вводятся сульфаты в количестве до (1-1.5)% в пересчете на SO_2 и ионы алюминия в количестве (1-2)% (в пересчете на Al_2O_3) от массы цемента, что в принципе повышает риск развития сульфатной коррозии» [10].

Сульфатостойкий бетон – это вид бетона, которая устойчиво переносит воздействие агрессивных сред. Получают такой бетон посредством добавления в раствор вместо обычного цемента сульфатостойкий. Состав такого цемента регулируется ГОСТ 22266-2013.

При рассмотрении свойств сульфатостойкого бетона одним из критериев является то, что чем выше плотность полученного материала, тем меньше он разрушается и хуже пропускает воду. Материал обладает высокой водонепроницаемостью. Одним из плюсов также является то, что сроки эксплуатации бетона с повышенной сульфатостойкостью намного выше, чем у обычного бетона.

Сульфатостойкий цемент в отличие от обычного цемента имеет высокий уровень устойчивости к агрессивному воздействию химических элементов.

«Это достигается за счет снижения содержания трикальцевого алюмината (C_3A) в клинкере, а также использования дополнительных компонентов» [8].

Сульфатостойкий цемент выпускают маркой М400, а с добавлением минеральных добавок выпускают также М400 и М500. Данных двух видов достаточно, чтобы обеспечить, прочность и долговечность материала в случае недостатка сульфатов алюминия в составе. Такой материал быстро не застывает, но при этом спустя 28 суток застывания имеет повышенную плотность.

При использовании малого количества алюмината в растворе бетона и присутствие в нем MdO и C_4AF исключает возникновение этtringита или по-другому «цементной бациллы», что в свою очередь улучшает свойства материала, делает его устойчивым к морозу, осадкам, а также влиянию агрессивной среды.

«Существенное влияние на сульфатостойкость оказывает содержание C_3A в цементе. С увеличением C_3A стойкость цементного камня снижается» [10].

Согласно ГОСТ Р 56687-2015 «Смеси бетонные. Метод определения сроков схватывания» «Метод определения сульфатостойкости бетона заключается в испытании образцов мелкозернистого бетона на заданном цементе, в том числе с вводимыми дополнительно минеральными и химическими добавками, определении группы сульфатостойкости цемента и

оценке сульфатостойкости бетона на исследованном цементе с учетом заданной водонепроницаемости бетона» [6].

Выводы по первой главе

По результатам первой главы был проведен анализ проблемы, рассмотрены научные работы, статьи на выбранную тему магистерской диссертации, а именно:

- рассмотрены основные материалы для возведения конструкций, их применение и влияние их друг на друга;
- рассмотрен сульфат алюминия в качестве добавки, характеристики материала;
- рассмотрены примеры использования сульфата алюминия и бетонов с добавками.

2 Характеристики используемых материалов и методики испытаний

Важное внимание следует уделять в первую очередь материалам, из которых будет в дальнейшем возведена та или иная конструкция.

Для выполнения данной магистерской диссертации планируется проведение испытаний. Испытания будут выполнены с целью сравнения характеристик бетона с включением добавок между испытываемыми образцами. Все образцы имеют форму куба и размеры 70,7 мм x 70,7 мм x 70,7 мм.

Данные по лабораторным испытаниям и количеству образцов для исследований указаны в соответствии с ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 31108-2020.

Для выполнения испытаний будет использована лаборатория Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства Архитектурно-строительного института Тольяттинского государственного института.

Приведенные ниже методы и материалы, которые будут использоваться соответствуют действующим требованиям государственных стандартов.

2.1 Материалы, используемые в исследованиях

2.2.1 Портландцемент

Портландцемент – это вяжущий материал, который получают путем совместного помола клинкера, гипса и добавок (на основе кальция).

Для выполнения испытаний принят цемент:

1) Портландцемент: Вольский цемент тип ЦЕМ I с классом прочности 42,5Н (М500-Д0).

Цемент – быстротвердеющий материал, использующийся для строительных работ. Цемент обладает повышенной прочностью, которая составляет 500 кг/см². Применяется для производства конструкций, на которые действуют высокие нагрузки.

«Цемент (рисунок 6) применяют в составе кладочного раствора при

возведении стен из кирпича или блоков. Данный состав идеально подходит для заливки фундаментов, бетонирования железных конструкций. Раствором можно выравнивать полы, стены, маскировать имеющиеся дефекты» [7].



Рисунок 6 – Портландцемент ЦЕМ I

Характеристики выбранного материала по ГОСТ 31108-2020 сведены в таблицу 1.

Таблица 1- Характеристика портландцемента ЦЕМ I

Наименование	Ед. изм.	Фактические значения
Характеристики материала		
Класс прочности цемента	-	42,5(нормальнотвердеющий)
Предел прочности при сжатии (2 суток)	МПа	26,2

Продолжение таблицы 1

Предел прочности при сжатии (28 суток)	МПа	49,1
Начало схватывания смеси	мин	145
Удельная поверхность	см ² /г	550
Нормальная густота цемента	%	26,75

Минералогический состав клинкера приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Минералогический состав клинкера

Наименование	Фактические значения
Минералогический состав клинкера, %	
Трехкальциевый силикат (C ₃ S)	58
Двухкальциевый силикат (C ₂ S)	22
Трехкальциевый алюминат (C ₃ A)	4,5
Четырехкальциевый алюмоферрит (C ₄ AF)	15

Используемый цемент является наиболее эффективным и оптимальным из всех цементов на рынке, так как применяется для разных поставленных задач. Данный материал подходит для бетонирования монолитных конструкций, а также сборных фундаментов, стен и перекрытий, для изготовления железобетонных конструкций. Также используется для бетонных растворов.

2.2.1 Мелкий заполнитель

При проведении испытаний помимо цемента будут использованы также мелкие и крупные заполнители. В данном случае мелким заполнителем является песок.

Песок – материал, необходимый для более лучшего схватывания бетонной смеси в процессе застывания. Песок в своем составе содержит оксид кремния.

При работе с бетонной смесью используют ГОСТ 10268-80 «Бетон тяжелый. Технические требования к заполнителям», который устанавливает точные требования и пропорции песчаного заполнителя, которые должны использоваться для изготовления смеси.

Песок используется Волжского месторождения. В таблицу 3 сведен гранулометрический состав выбранного песка» [5].

На рисунке 7 представлено сито с круглыми отверстиями диаметром 5, 2,5 мм и сетками 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм для определения гранулометрического состава песка.

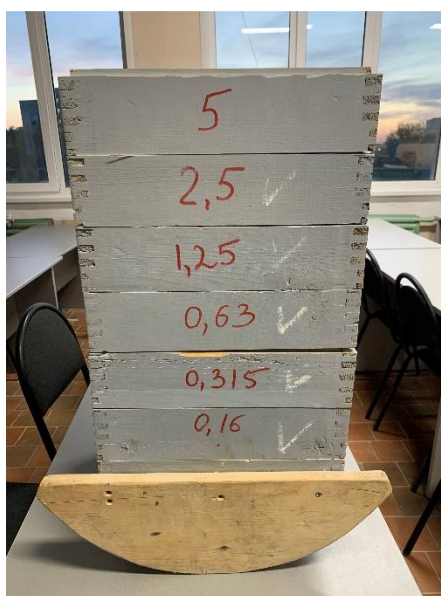


Рисунок 7 – Определение гранулометрического состава песка

Таблица 3 – Гранулометрический состав песка

Гранулометрический состав речного песка		
№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
	Волжский песок	
2,5	0,40	0,40
1,25	0,38	0,38
0,63	1,20	1,20

Продолжение таблицы 3

0,315	30,1	30,1
0,16	65,8	97,9
<0,16	2,10	100
M _{кр}	1,33	

Насыпная плотность песка – 1200-1700 кг/м³.

Количество пылеватых, илистых и глинистых частиц – 3%.

Исходя из данных таблицы 3 по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», подобранный вид заполнителя (песка) является очень мелким.

На рисунке 8 представлен используемый песок Волжского месторождения.



Рисунок 8 - Речной Волжский песок

2.2.2 Крупный заполнитель

Под крупным заполнителем в составе бетона подразумевается

щебень.

«Щебень в бетоне выполняет следующие функции:

- выступает в роли каркаса для цемента, песка и т.д.;
- имея неровную поверхность улучшает адгезию с другими материалами;
- способствует улучшению гидроизоляционных свойств;
- делает конструкции более упругими, в них не образуются трещины и усадки» [14].

На рисунке 9 представлен используемый щебень.

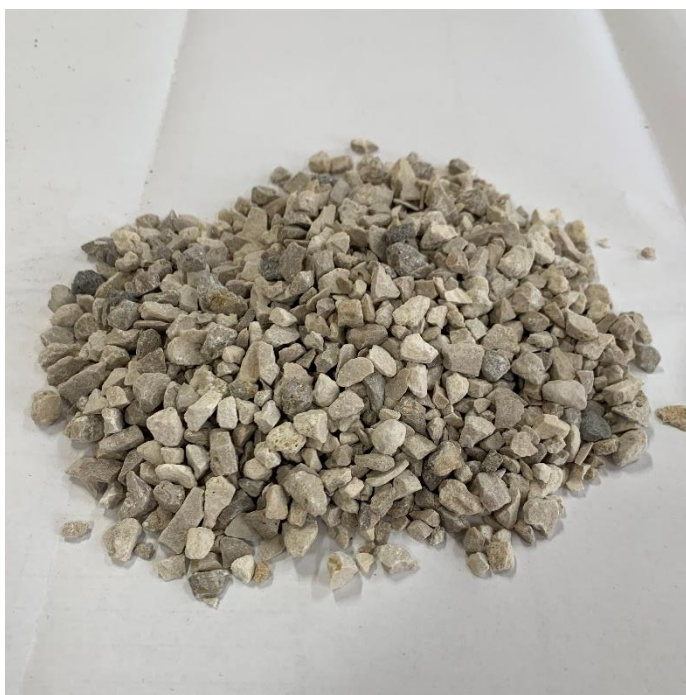


Рисунок 9 - Щебень

Для данной работы принимается щебень по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». Щебень получен дроблением пород из гранодиорита с фракцией 5-10 мм.

Технические характеристики щебня представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Характеристика крупного заполнителя

Наименование	Значение
Марка по дробимости	M1200
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы	36%
Марка по истираемости	И-I
Насыпная плотность	1265 кг/м ³
Морозостойкость	F200

2.2.3 Сульфат алюминия

Сульфат алюминия – сложный химический элемент с формулой $Al_2(SO_4)_3$. На рисунке 10 представлен гранулированный сульфат алюминия.



Рисунок 10 – Гранулированный сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$.

«Сульфат алюминия имеет орторомбическую решетку. Плотность материала – 2,710 г/см³, удельная теплоемкость составляет 259,6 Дж/(моль К). Также при фасовке сульфат может иметь и жидкую форму, не имеющую

цвета» [16]. Материал представляет собой бесцветные кристаллы. Как правило, сернокислый алюминий используют по большей части в промышленной и химической сфере. Сульфат алюминия используют для очистки промышленной (технической) воды на предприятиях химводоочистки и водоподготовки, так как материал обладает свойством удалять из жидкости тяжелые металлы и другие микрочастицы. Также сульфат алюминия способен улучшать влагостойкость материалов в качестве гидролизатора.

«Сульфат алюминия получают путем обработки боксита или глины раствором серной кислоты, а особо чистое соединение, - погружая $\text{Al}(\text{OH})_3$ в нагретую концентрированную H_2SO_4 »[15].

На рисунке 11 можно увидеть структурную формулу сульфата алюминия.

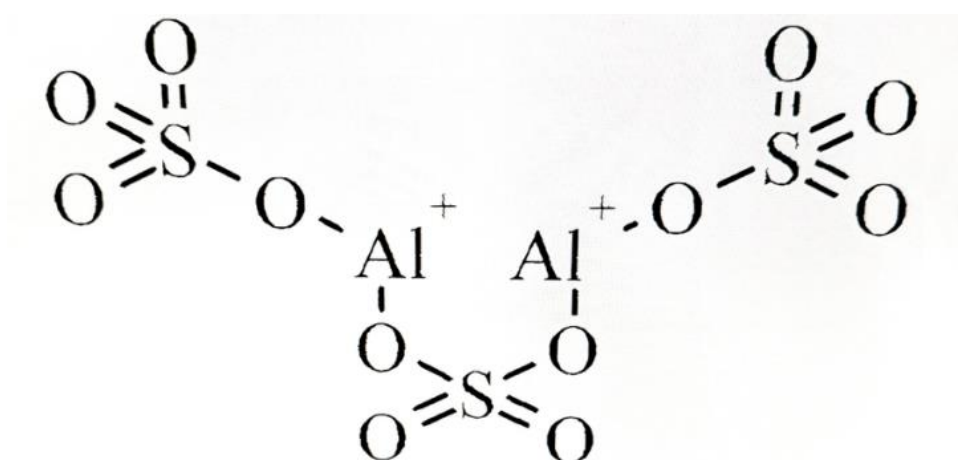


Рисунок 11 – Структурная формула соединения $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Как и любое другое вещество сульфат алюминия, известный как квасцы, имеет ряд основных химических свойств.

Согласно ГОСТ 12966-95 «Алюминий сульфат технический очищенный. Технические условия» «По физико-механическим показателям сульфат алюминия должен соответствовать требованиям и нормам, указанным

в таблице 5.

Таблица 5 - Таблица показателей физико-механических свойств материала.

Наименование показателя	Норма для сорта		
	высшего	1-го	2-го
Внешний вид	Однородный сыпучий материал с размером частиц не более 20 мм белого цвета	Неслеживающиеся пластинки, брикеты, куски неопределенной формы и разного размера массой не более 10 кг белого цвета	
	Допускаются бледные оттенки серого, голубого или розового		
Массовая доля оксида алюминия, %, не менее	16	16	15
Массовая доля нерастворимого в воде остатка, %, не более	0,3	0,3	0,7
Массовая доля железа в пересчете на оксид железа (III), %, не более	0,02	0,02	0,30
Массовая доля свободной серной кислоты (H ₂ SO ₄), %, не более	Выдерживает испытание		0,1
Массовая доля мышьяка в пересчете на оксид мышьяка (III), %, не более	0,001	0,001	0,003

К основным физико-химическим свойствам элемента относят:

1. Гигроскопичность – свойство вещества поглощать из воздуха водяные пары.

2. Растворимость – свойство материала подвергаться растворению в воде или других растворителях. Сульфат алюминия хорошо растворим в воде.

3. Гидролиз – свойство вещества разлагаться под воздействием воды. При разложении сульфата алюминия образуется кислая среда, благоприятная для использования его в промышленных процессах.

4. Образование соединений. Сульфат алюминия может образовывать соединения реагируя с щелочами, образуя при этом алюминаты и другие соединения.

5. Термическая стабильность. При нагревании материала выше 580 °С сульфат алюминия разлагается на оксид алюминия и серный ангидрид.

«Помимо чистого сульфата алюминия используют в промышленности и его кристаллогидрат $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ или же сульфат алюминия 18 водный» [15].

Кристаллогидрат представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Кристаллогидрат сульфата алюминия в виде порошка

Водный раствор сульфата алюминия в промышленных условиях получают, смешивая с серной кислотой чистый алюминий или его гидроксид. Применяется водный раствор для медицинских или лабораторных нужд. Материал выпускается в двух видах: чистый (Ч) и чистый для анализа (ЧДА).

Также сульфат алюминия используют для защиты поверхности твердеющего бетона. На обрабатываемую поверхность, после укладки бетона, наносят состав на основе сульфата алюминия посредством распыления. Приведенный способ защиты ускоряет процессы твердения внешнего слоя бетона, вне зависимости от конфигурации конструкции.

Если разложить его по физическим свойствам, то получим что:

- температура плавления сульфата алюминия 86,5 °С непосредственно для кристаллогидрата $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$;
- молекулярная масса вещества составляет 342,15 г/моль;
- энтальпия образования составляет -8905,7 кДж/моль.

Сульфат алюминия не взрывопожароопасен.

Также «сульфат алюминия в холодном концентрированном растворе аммиака образует осадок гидроксида, а в горячем – метагидроксида алюминия» [37].

Сульфат алюминия в качестве ускорителя можно комбинировать непосредственно с другими химическими добавками для того, чтобы добиться определенных результатов. Например, сульфат алюминия можно использовать в сочетании с хлоридом кальция или алюмината натрия. Такая комбинация может усилить общее влияние на свойства бетона.

Несмотря на то, что в применении добавок в состав бетона уже накоплен определенный опыт, непосредственный вклад алюминатных соединений имеет прямое отношение к долговечности цементной смеси.

2.2.4 Суперпластификатор

Суперпластификатор – это специальная химическая добавка, способствующая улучшению физико-химических характеристик бетона, посредством добавления ее в состав бетонной смеси. Иначе добавку ещё называют модификатором или присадкой.

Суперпластификаторы не меняют основные компоненты смеси (цемент, воду, песок), а лишь придают ей дополнительные качества.

Применяемые пластификаторы по методу действия создают отрицательный заряд на поверхности цемента, что в последствии позволяет создать текучую смесь с низким содержанием воды. Тем самым суперпластификаторы значительно улучшают физико-механические свойства бетона.

Пластификаторы или присадки по своему составу делят на однокомпонентные (в состав пластификатора, кроме воды, входит только одно вещество) и комплексные (в состав входят несколько органических или неорганических компонентов).

Для выполнения испытаний принимается суперпластификатор «CEMMIX CemPlast» (рисунок 13).



Рисунок 13 – Суперпластификатор «CemPlast»

Используемый пластификатор относится к быстротвердеющим. По составу данный пластификатор является жидким, готовым к применению на месте использования, изготовлен на основе поликарбоксилатов. Пластификатор представляет собой мутную светло-коричневую жидкость.

Технические характеристики пластификатора:

- плотность: 1,03-1,19 кг/дм³;

- показатель pH: 7,2-8,5

«Добавка позволяет:

1. Значительно экономить цемент;
2. Повысить удобоукладываемость бетонных и растворных смесей с П1 до П5;
3. Увеличить раннюю (на 10-25%) и марочную (на 10-20%) прочность бетона (при неизменной удобоукладываемости);
4. Снизить водопотребность бетонной/растворной смеси на 10 – 20 %;
5. Получить подвижные смеси, укладываемые без вибрации;

6. Повысить живучесть бетонной смеси до 1,5 - 2 часов в зависимости от качества применяемых материалов, условий изготовления и транспортирования бетонной смеси;
7. Получить высокоподвижные бетонные смеси без расслоения и замедления твердения бетона в ранние сроки;
8. Повысить активность вяжущего и полноту гидратации вследствие пептизирующего действия добавки;
9. Увеличивает долговечность в 2-3 раза;
10. Предотвращает появление трещин» [33].

«Суперпластификатор позволяет получить высокоподвижные бетонные смеси, снизить трудозатраты на обработку и кладку бетона, снижает количество воды в бетонной смеси, повышает степень реагирования цемента, прочность и долговечность бетонных изделий. При работе с добавкой использовать перчатки, при попадании в глаза тщательно промыть водой» [31].

Механизм действия поликарбоксилата представлен на рисунке 14.

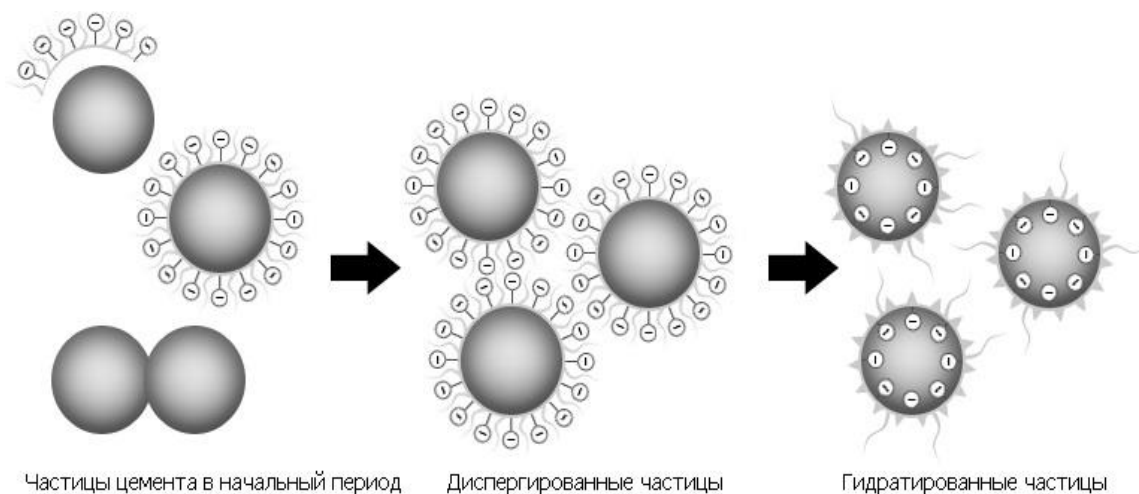


Рисунок 14 - Механизм действия поликарбоксилата

Подобные суперпластификаторы предназначены для производства конструкций разных видов. С их помощью получают более качественные бетонные смеси.

При добавлении в бетон суперпластификатора можно получить преднапряженный бетон, достаточно высокопрочный и водонепроницаемый относительно других.

2.2.5 Ускоритель твердения

Ускоритель твердения – добавка, воздействующая на повышение набора прочности бетона.

За счет ускорителей твердения можно получить бетоны с улучшенными характеристиками, такими как: морозостойкость, водонепроницаемость, пониженные сроки снятия опалубки и быстрое изготовление железобетонных и бетонных конструкций.

Для выполнения испытаний и сравнения результатов можно в качестве добавки использовать ускоритель твердения.

В магистерской работе используется ускоритель твердения «CEMMIX CemFix» (рисунок 15).



Рисунок 15 – Ускоритель твердения «CemFix»

С использованием данного ускорителя твердения решено провести сравнение с добавками сульфата алюминия и гидрата алюминия.

С помощью ускорителей возможно увеличить гидратацию бетона, тем самым запустить быстрый процесс застывания бетона.

Подобранный ускоритель предназначен для запуска быстрого процесса схватывания бетона в бетонных и железобетонных конструкциях вплоть до марочной прочности.

«Состав значительно уменьшает оборачиваемость форм и на 10-15% сокращает потребление цемента, одновременно увеличивая поверхностную прочность. Действует даже в условиях повышенной влажности и низких температур. С помощью ускорителя твердения CemFix, можно легко ускорить время гидратации бетона, в результате чего существенно сократить общую продолжительность технологического цикла» [29].

Технические характеристики ускорителя:

- плотность: 1,185 кг/дм³;
- показатель pH: 7,2-8,5.

«Добавка позволяет:

1. Увеличить раннюю (на 20-40%) и марочную (на 15-20%) прочность бетона (при неизменной удобоукладываемости);
2. Снизить режимы термообработки без снижения распалубочной прочности;
3. Повысить оборот формооснастки;
4. Снизить водопотребность бетонной/растворной смеси на 10 – 12 %;
5. Сократить расход цемента на 5-10%.
6. Повышает водонепроницаемость
7. Не вызывает коррозии арматуры» [28].

В данной магистерской работе в виде основной добавки в бетонную смесь, в качестве ускорителя твердения исследуется сульфат алюминия, для проверки влияния его в составе бетона на прочностные характеристики. Сульфат алюминия добавляется в качестве порошкообразного вещества в состав бетонной смеси на этапе замешивания.

2.3 Методы экспериментальных исследований

По результатам выбора используемых материалов требуется провести испытания, касающиеся способности нового бетона воспринимать нагрузку от внешних факторов, а также требуется определить подвижность бетонной смеси, нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста.

Для этого производят подбор методов исследования материала.

Объем материала, взятого для проведения испытаний должен превышать необходимый объем материала не менее чем в 1,2 раза. Так как в последствии такой материал как бетон может дать усадку, что в последствии и даст нам необходимый изначально объём материала.

2.3.1 Песок

Характеристика мелкого заполнителя определяется в соответствии с ГОСТ 8736-2012 «Песок для строительных работ. Технические условия».

«Для определения зернового состава и модуля крупности, используемого мелкого заполнителя – песка, необходимо пропустить материал через набор сит с сетками 5 мм, 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм» [22].

«Модуль крупности песка – это условная величина, характеризующая средний размер зерен песка и рассчитываемая как сумма остатков на стандартном наборе сит, деленная на 100. Определение модуля крупности позволяет оценить пригодность песка для различных строительных нужд, так как от него зависит качество получаемых строительных смесей и бетонов» [22].

«Согласно ГОСТ 8736-2014 модуль крупности песка определяют следующим образом. От пробы массой не менее 2 кг отделяют сначала с помощью сит частицы размером более 10 и 5 мм; из оставшейся массы берут пробу массой 1 кг и просеивают её последовательно через сита с ячейками размером от 2,5 мм до 0,16 мм (всего 5 сит)» [22].

«Количество песка в процентах от 1000 г, оставшегося на каждом сите

фиксируют. Просеивание при выполнении операций останавливают, когда песок перестаёт проходить через ячейки.

Модуль крупности песка вычисляют по формуле:

$$M_k = (A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}) / 100,$$

где $A_{\dots}$ — полные остатки на пяти ситах в процентном отношении к общей массе» [22].

Также для определения насыпной плотности песка используют конус (рисунок 16).



Рисунок 16 – Конус для определения насыпной плотности песка

«Засыпание песка происходит до образования над верхом цилиндра конуса с высоты 10 см от верха сосуда. Уплотнение песка не требуется. Далее конус срезают металлической линейкой по краям емкости, после это ее взвешивают» [25].

Окончательный результат вычисляют как среднее арифметическое двух определений.

2.3.2 Щебень

«Методы испытаний щебня определены межгосударственным стандартом ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» [34].

Одним из основных методов испытаний щебня является определение зернового состава. Для этого щебень просеивают через сита с размерами 20, 10 и 5 мм. В щебне фракции 5-10 мм, используемом в исследованиях, определяют количество игловатых, лещадных зерен и зерен кубовидной формы.

Марку щебня по дробимости в цилиндре определяли, используя сосуд малого диаметра в сухом состоянии.

Процесс определения дробимости марки щебня приведен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Определение марки щебня по дробимости

«Щебень допускается испытывать как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии. Аналитические пробы для испытания в сухом состоянии высушивают до постоянной массы, а для испытания в насыщенном водой состоянии погружают в воду на 2 ч» [26].

2.3.3 Подбор состава бетонной смеси

Согласно ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава» «Подбор состава бетона следует проводить в целях получения бетонной смеси с заданными технологическими показателями и бетона с прочностью и другими нормируемыми показателями качества, установленными в задании на подбор состава бетона в соответствии с проектной и технологической документацией на изготовление этих изделий или конструкций» [20].

Подбор состава смеси включает в себя:

- назначение номинального состава на основе расчета, экспериментальной проверки и корректирования начальных составов;
- назначение рабочего состава бетона;
- корректирование рабочего состава бетона при поступлении партий материалов тех же видов, марок и классов, которые принимались при подборе номинального состава, но с учетом их фактического качества;
- проверку в лабораторных и производственных условиях рабочих составов после их корректирования.

2.3.4 Определение подвижности бетонной смеси

Перед изготовлением бетонных образцов необходимо определить подвижность бетонной смеси.

«Для определения подвижности бетонной смеси применяют: нормальный или увеличенный конус, металлическую линейку по ГОСТ 9533, загрузочную воронку, кельму типа КБ по ГОСТ 9533, прямой металлический гладкий стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм с округленными концами» [24].

Конус устанавливают на гладкий лист и заполняют бетонной смесью

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 минуты. 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.

Определение осадки конуса – рисунок 18.

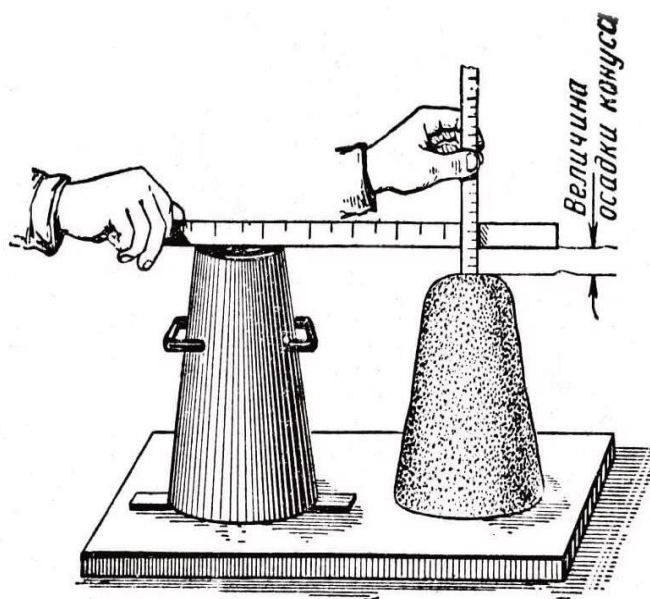


Рисунок 18 – Определение осадки конуса

«Уже готовый раствор перекладывают в металлические формы. Далее происходит процесс трамбовки. Выполняют трамбование и уплотнение с помощью виброплощадки, после чего образцы в формах накрывают влажной тканью. Ткань способствует предотвращению испарения влаги» [20].

Формирование образцов в формах, после трамбования смеси представлен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Формование образцов

«По истечению суток образцы достают и выдерживают в камере для твердения в течение 1, 3, 7 и 28 суток при температуре 20 ± 5 °С, относительной влажности воздуха 95 ± 5 %.» [5].

2.3.5 Определение нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания

«Нормальная густота цементного теста – это количество воды затворения в составе смеси, выраженное в процентах от массы» [28].

Определяют нормальную густоту с помощью прибора «Вика». В данном методе нормальной густотой считается условие, при котором пестик прибора «Вика» погруженный в кольцо с цементным тестом не доходит до дна кольца на 5-7мм.

Метод определения нормальной густоты цементного теста установлен ГОСТ 310.3-76. Для испытаний используют прибор «Вика» с пестиком из

нержавеющей стали и кольцом, изготовленным из материала, не впитывающего воду.

«Порядок проведения испытаний:

- Подготовить пробу цемента по ГОСТ 310.1. 23;
- Проверить свободное падение стержня прибора «Вика» и нулевое показание прибора. При отклонении от нуля шкалу прибора передвигают;
- Смазать кольцо и пластинку тонким слоем машинного масла;
- Приготовить цементное тесто;
- Перемешать и растереть тесто лопаткой в течение 5 минут;
- Уложить тесто в кольцо, 5–6 раз встряхнуть, постучать пластинкой с кольцом о твёрдое основание. Избыток теста срезать ножом;
- Привести пестик прибора в соприкосновение с поверхностью теста в центре кольца, закрепить стержень стопорным устройством, затем быстро освободить его и предоставить пестику свободно погружаться в тесто;
- Через 30 секунд с момента освобождения стержня зафиксировать глубину погружения пестика по шкале. Кольцо с тестом при отсчёте не должно подвергаться толчкам» [17].

На рисунке 20 представлено определение нормальной густоты цементного теста с помощью прибора «Вика».



Рисунок 20 – Определение нормальной густоты цементного теста

Если по результатам испытаний консистенция теста не соответствует нормальной густоте, то требуется изменить количество воды и вновь замешать цементное тесто.

Также необходимо проверить сроки схватывания цементного теста.

Сроки схватывания цементного теста — это время, в течение которого происходит застывание цементной массы.

Для определения сроков схватывания необходимо использовать также прибор «Вика». В данном случае для проведения метода испытаний потребуется вместо пестика использовать иглу.

Процесс проведения испытания описан в ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема».

Для начала необходимо приготовить цементное тесто и определить нормальную густоту. После определения требуется поместить приготовленное тесто в кольцо прибора и слегка встряхнуть для удаления лишних пузырьков воздуха. Впоследствии необходимо снять ножом избыток теста и выровнять поверхность.

После проведенных манипуляций необходимо установить кольцо прибора с цементным тестом на стол прибора.

При проведении метода необходимо погружать иглу в тесто с разницей в 10 минут, постепенно передвигая кольцо.

На рисунке 21 представлено определение сроков схватывания цементного теста с помощью прибора «Вика».



Рисунок 21 – Определение сроков схватывания цементного теста

«Начало схватывания считают время от начала затворения (момента приливания воды) до момента, когда игла не доходит до пластинки на 2–4 мм. Концом схватывания — время от начала затворения до момента, когда игла опускается в тесто не более чем на 1–2 мм» [17].

2.3.6 Определение предела прочности

Данный метод выполняется с помощью бетонных образцов в виде кубов. Размеры для образцов принимаются стандартными, с размерами граней 70,7 мм x 70,7 мм x 70,7 мм. Для проведения испытаний используют гидравлический пресс.

«В помещении для испытания образцов следует поддерживать температуру $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ и относительную влажность воздуха не менее 55 %. Образцы должны быть выдержаны до испытания при указанных условиях в распалубленном виде в течение 24 ч, если они твердели в воде, и в течение 4 ч, если они твердели в воздушно-влажностных условиях или в условиях тепловой обработки» [19].

«Перед проведением испытаний каждый образец подвергается предварительному осмотру на наличие трещин и сколов. При обнаружении трещин образцы, выбранные для проведения испытаний, к испытаниям не допускаются» [19].

После осмотра проводятся испытания образцов на гидравлическом прессе (рисунок 22).



Рисунок 22 – Испытание образца на гидравлическом прессе

Далее постепенно необходимо наращивать усилия вплоть до полного разрушения материала.

Для проведения дальнейшего анализа проведенных испытаний бетонный образец осматривают на определение характера разрушений.

«Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимают за разрушающую нагрузку» [19].

После завершения испытаний подводится результат, на основании которых делают вывод о качестве всех материалов, относящихся к данному испытываемому образцу.

Выводы по второй главе

По результатам данной главы был представлен метод проведения испытаний образцов на гидравлическом прессе, методы определения нормальной плотности цементного теста и сроков схватывания.

Были подобраны и исследованы материалы, их состав, и эффект от включения выбранных материалов в работу бетона. Также были изучены физико-механические свойства материалов.

3 Оценка результатов проведенных испытаний

3.1 Эффективность сернокислого алюминия в качестве ускорителя схватывания

Основным строительным материалом считается бетон. Скорость набора прочности бетона во многом определяет темпы возведения зданий и сооружений.

«Современной технологией ускорения набора прочности бетона на ранних сроках твердение является разработка и использование комплексных добавок для бетона – пластификаторов-ускорителей набора прочности. Данные добавки позволяют значительно сократить сроки твердения бетона и сроки строительства в целом» [38].

В настоящее время в качестве ускорителя твердения используется большое количество добавок. К ним относятся хлорид кальция, сульфат натрия, нитрит-нитрат-хлорид кальция, Sika, Реламикс Т-2, и др.

При выборе ускорителя твердения учитывается негативное влияние добавок, например, на коррозию арматуры и бетон. Использование и допустимое количество добавок регламентируется СП 130.13330.2018 «Свод правил. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий», СНиП 3.09.01-85. Согласно СНиП «Химические, минеральные и органо-минеральные добавки должны соответствовать требованиям ГОСТ 24211, ГОСТ Р 56592, ГОСТ 25818, ГОСТ 25592 и технических условий, по которым они выпускаются». Например, хлориды коррозионно влияют на арматуру, поэтому их количество в составе железобетона ограничивается 0,5%.

В соответствии с ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» ускорители твердения относятся ко 2 классу добавок по показанию основного эффекта действия и критерию эффективности добавок, регулирующие кинетику твердения».

В данной работе проведены испытания сульфата алюминия в качестве добавки, как ускоритель твердения по ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов

и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

Сульфат алюминия в качестве добавки, как ускорителя твердения, исследовался в сочетании с портландцементом и суперпластификатором, применяемых в местных условиях.

Сульфат алюминия использовался в виде безводного $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и в виде гидрата алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (соответственно ГОСТ 3758-75 «Реактивы. Алюминий сернокислый 18-водный. Технические условия» и ГОСТ 12966-85 «Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия»).

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Вольского завода, в качестве суперпластификатора – CEM Plast.

Химический и минералогический состав портландцемента Вольского завода приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Минералогический состав портландцемента

Содержание оксидов в цементе, %						Содержание клинкерных минералов, %			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	HgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
66,5	21,4	5,5	4,2	1,55	0,4	58	22	4,5	14

Технические характеристики портландцемента:

- предел прочности при сжатии (в возрасте 2 суток) – 26,2 МПа, (в возрасте 28 суток) – 49,1 МПа;
- начало схватывания – 145 минут, конец схватывания – 280 минут;
- удельная поверхность – 550 м²/кг;
- тонкость помола (проход через сито №008) – 97%;
- нормальная густота цементного теста – 26,75%.

При введении добавки суперпластификатора CEM Plast в количестве 1% от массы цемента подвижность бетонной смеси увеличивается от 1 до 15 см.

Полученную бетонную смесь можно рассмотреть на рисунке 23.



Рисунок 23 - Полученная бетонная смесь

В соответствии с ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерность изменения объема» «определена нормальная густота цементного теста и сроки схватывания» [38]. Результаты исследований влияния добавки сернокислого алюминия на нормальную густоту цементного теста и сроки схватывания приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста

Количество вводимой добавки			Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания, мин.	
Без добавки	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$		начало	конец
0	-	-	26,75	145	285
-	1	-	26,75	50	90
-	2	-	26,75	45	85
-	3	-	26,75	40	80
-	-	1	26,75	40	80
-	-	2	26,75	46	68
-	-	3	26,75	35	60

Исходя из данных таблицы видно, что добавка сернокислого алюминия не оказывает влияния на нормальную густоту, но влияет на сроки схватывания цементного теста.

По сравнению с контрольным составом начало схватывания портландцемента с добавками уменьшается на 95-110 мин, конец схватывания - на 195-225 мин (соответственно на 65,5-75,9% и 68,4-78,9%).

Более эффективна по срокам схватывания добавка в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Результаты данных таблицы соотнесем в виде диаграмм (рисунок 24 и 25).

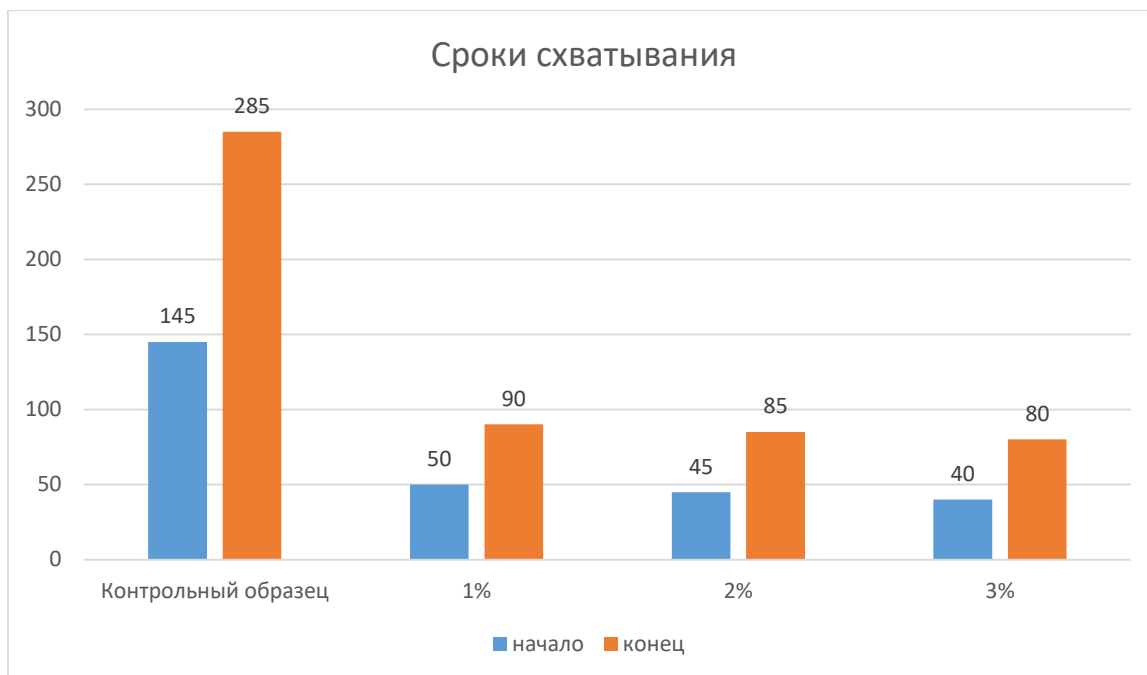


Рисунок 24 – Сроки схватывания цементного теста при добавлении $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

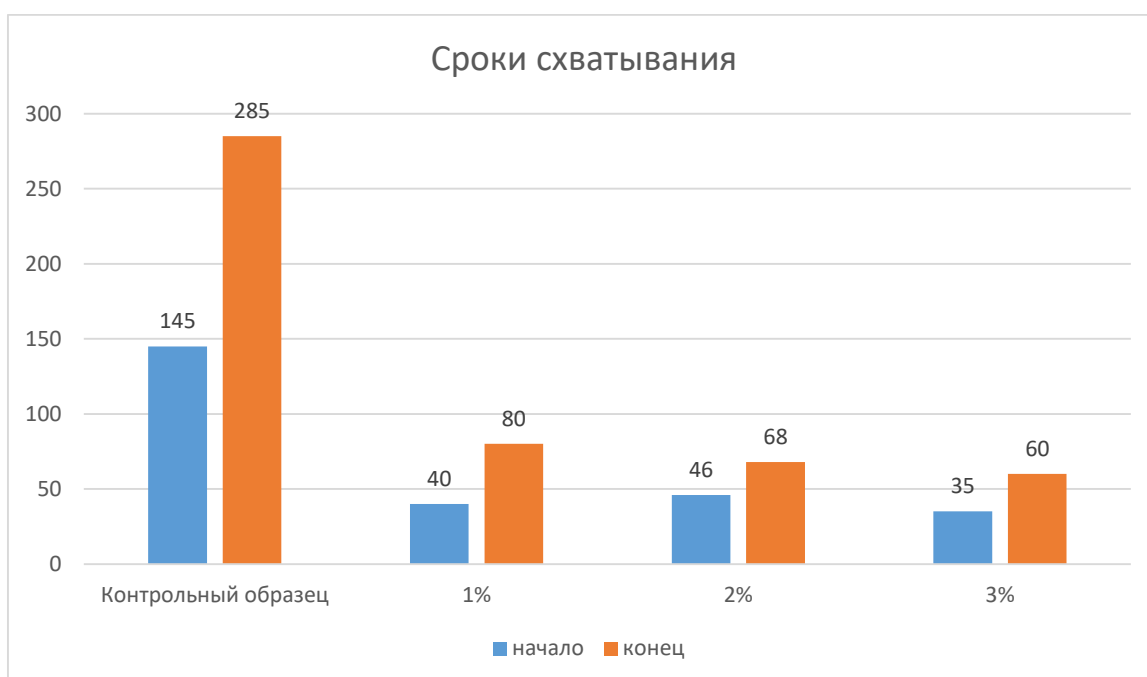


Рисунок 25 – Сроки схватывания цементного теста при добавлении $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

3.2 Влияние добавки сернокислого алюминия на прочность бетона.

В последние десятилетия для повышения качества бетона и долговечности железобетонных конструкций используется высокотехнологичное оборудование, внедрение ВІМ – технологии, при этом применяются материалов высокого качества и добавки полифункционального действия.

Использование добавок является наиболее эффективным и экономичным способом улучшения технологических и физико-механических свойств бетона.

Изучено влияние сернокислого алюминия в качестве добавки, как ускорителя твердения на прочность бетона. Выполнены испытания бетона по ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Для исследований использовались портландцемент ЦЕМ І 42,5 Н Вольского завода, природный песок Волжского месторождения, щебень фракции 5-10мм из гранодиоритов марки по дробимости в цилиндре М1200.

В качестве пластифицирующей добавки при изготовлении бетонных смесей использовался суперпластификатор СЕМ Plast.

В соответствии с ГОСТ 18105-2018 из бетонных смесей подвижностью 12-15 см были изготовлены бетонные образцы размером 70,7х70,7х70,7 мм.

Составы бетонных смесей приведены в таблице 8.

Таблица 8- Составы бетонных смесей.

Компоненты / № партии	4 Контрольный образец	5 1%	6 2%	7 3%	9 Вод- ный 1%	10 Вод- ный 2%	11 Вод- ный 3%
Единицы измерения, кг/м ³							
Портландцемент	556	555	591	679	558	604	626

Продолжение таблицы 8

Вода	250	250	266	305	251	272	289
Песок	751	749	722	651	753	737	722
Щебень	711	710	685	618	714	701	690
Суперпластификатор СЕМ Plast	6	5	6	7	5	6	6
Добавка $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$							
1%		5					
2%			12				
3%				14			
Добавка $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$							
1%					5		
2%						12	
3%							14
Плотность, кг/м^3	2274	2274	2282	2274	2286	2332	2346

Водоцементное отношение контрольного состава и составов с добавками сернокислого алюминия составило 0,45.

Добавки сернокислого алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) вводились в бетонную смесь с водой затворения.

При введении в бетонную смесь добавки сернокислого алюминия подвижность бетонной смеси уменьшалась и смесь становится более жесткая.

С добавлением в бетонную смесь большего количества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ водопотребность цементного теста увеличивается и для достижения равной подвижности (осадка конуса 12-15 см) в бетонную смесь добавлялись портландцемент, вода, суперпластификатор и добавка сернокислого алюминия.

К примеру, при добавлении 2% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ в цементное тесто (партия №6) для сохранения подвижности добавили 10% цемента и воды. А при добавлении 3% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ в цементное тесто для сохранения подвижности добавили уже 40% цемента и воды, пластификатора и добавки (партия №7).

Изготовленные в лабораторных условиях бетонные образцы выдерживались в нормальных условиях твердения (при температуре 20 градусов и относительной влажности более 95%).

Образцы, изготовленные для испытаний на сжатие рассмотрены на рисунке 26.



Рисунок 26 – Образцы, готовые к испытаниям на сжатие

Испытания образцов на прочность выполнялись на гидравлическом прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 50 т.

Влияние добавки сернокислого алюминия на прочность бетона нормального твердения в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток приведено в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии

Возраст	Предел прочности на сжатие, МПа						
	4 партия	5 партия	6 партия	7 партия	9 партия	10 партия	11 партия
1 сутки	$\frac{26,5 *}{41,9}$	$\frac{26,7}{41,6}$	$\frac{27,7}{41,9}$	$\frac{25,3}{49,6}$	$\frac{26,9}{40,3}$	$\frac{23,3}{35,6}$	$\frac{23,0}{40,4}$
3 суток	$\frac{52,0 *}{82,3}$	$\frac{52,5}{81,9}$	$\frac{52,5}{79,4}$	$\frac{45,9}{90,0}$	$\frac{46,9}{70,2}$	$\frac{40,8}{62,4}$	$\frac{38,2}{67,0}$
7 суток	$\frac{57,6 *}{91,1}$	$\frac{58,1}{90,6}$	$\frac{59,0}{89,5}$	$\frac{49,2}{96,5}$	$\frac{57,5}{86,1}$	$\frac{53,5}{81,8}$	$\frac{47,0}{83,5}$
28 суток	$\frac{63,2 *}{100,0}$	$\frac{64,1}{100,0}$	$\frac{66,1}{100,0}$	$\frac{51,0}{100,0}$	$\frac{66,8}{100,0}$	$\frac{65,4}{100,0}$	$\frac{57,0}{100,0}$

Примечание•: над чертой приведено значение предела прочности при сжатии образцов бетона, под чертой – относительная прочность от R28.

Бетонные образцы после проведения испытаний указаны на рисунке 27.



Рисунок 27 – Бетонные образцы после проведения испытаний на сжатие

После завершения испытаний каждый бетонный образец осматривался на наличие дефектов.

Результаты данных таблицы 9 соотнесем в виде диаграмм (рисунок 28 и 29).

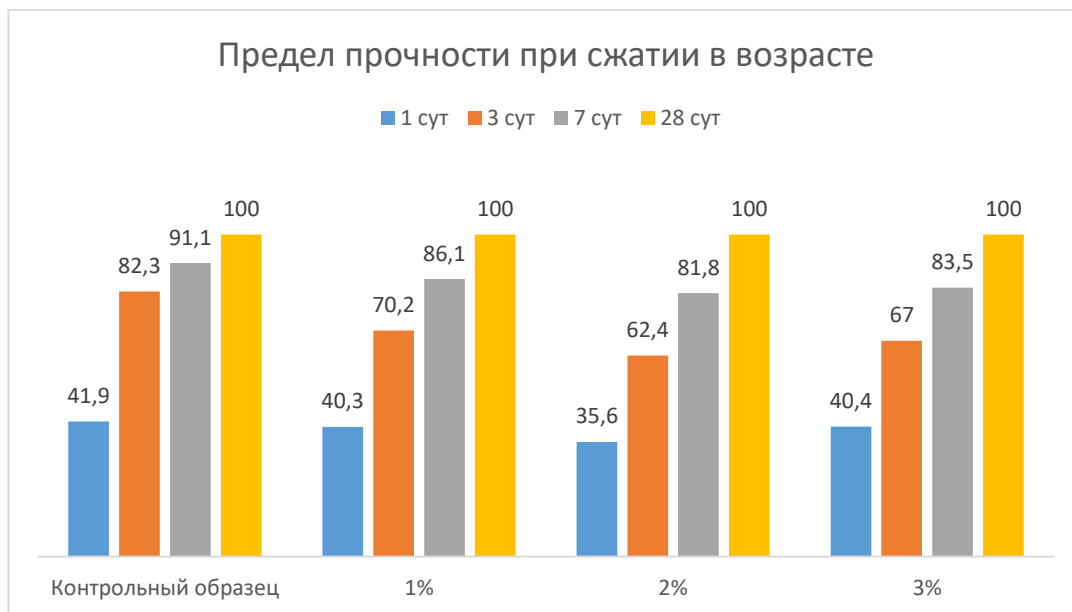


Рисунок 28 – Прочность бетонных образцов при добавлении в бетонную смесь $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

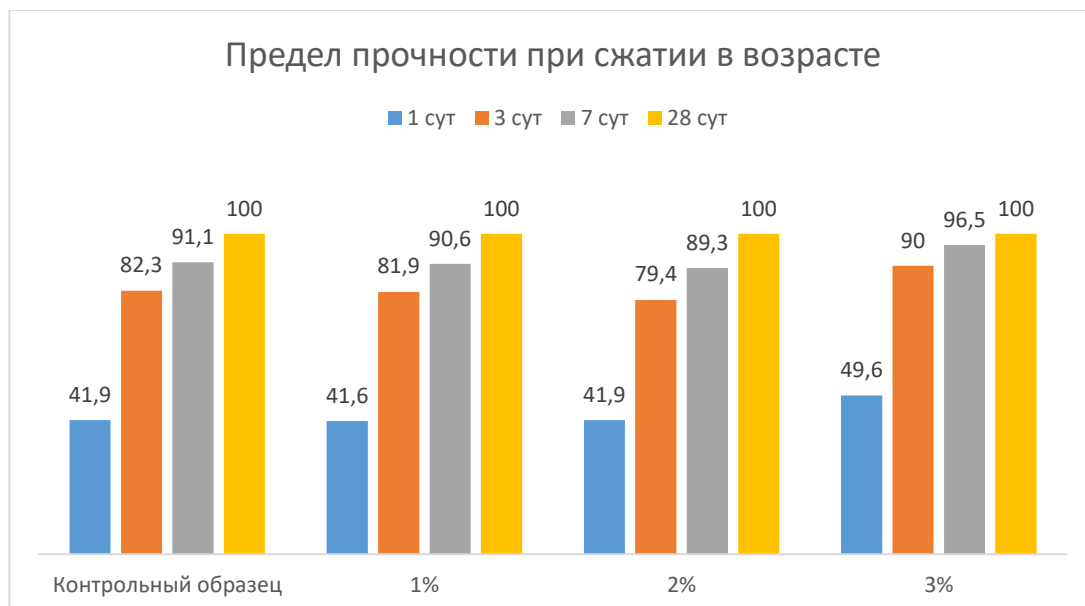


Рисунок 29 – Прочность бетонных образцов при добавлении в бетонную смесь $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

Действие сернокислого алюминия на прочностные свойства бетона было проверено в сравнении с использованием в качестве ускорителя твердения Cem Fix.

Состав бетонной смеси партии 8 с использованием в качестве ускорителя Cem Fix в количестве 1% от массы цемента аналогичен составу бетонной смеси партии 4, но подвижность бетонной смеси резко увеличилась по сравнению с подвижностью контрольного состава и составов с добавками сернокислого алюминия в количестве 1-2%. Подвижность бетонной смеси увеличилась от ПЗ до R5.

Состав бетонной смеси (партия 8) с использованием в качестве ускорителя твердения Cem Fix представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Состав бетонной смеси партии 8

Номер партии	Компоненты, кг/м ³					
	Цемент	Вода	Песок	Щебень	Cem Plast	Cem Fix
8	569	256	768	727	6	6

Плотность бетонной смеси партии 8 – 2332 кг/м³

Результаты испытаний бетонных образцов с использованием в качестве ускорителя твердения CemFix (партия 8) представлены в таблице 11 в сравнении с прочностью контрольных образцов бетона и образцов бетона с добавлением сернокислого алюминия в количестве 1% от массы цемента (партия 5).

Таблица 11 - Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии

Номер партии	Предел прочности на сжатие в возрасте, сутки			
	1	3	7	28

Продолжение таблицы 11

4	$\frac{26,5 *}{41,9}$	$\frac{52,0 *}{82,3}$	$\frac{57,6 *}{91,1}$	$\frac{63,2 *}{100,0}$
5	$\frac{26,7}{41,6}$	$\frac{52,5}{81,9}$	$\frac{58,1}{90,6}$	$\frac{64,1}{100,0}$
8	$\frac{22,0}{32,3}$	$\frac{50,4}{74,1}$	$\frac{55,8}{82,1}$	$\frac{68,0}{100,0}$

Примечание*: над чертой приведено значение предела прочности при сжатии образцов бетона, под чертой – относительная прочность от R28.

Прочность бетонных образцов партии 8 (с использованием в качестве ускорителя твердения Cem Fix) уже в первые сутки резко снижается на 17% по сравнению с прочностью образцов контрольной партии. Через 3 и 7 суток твердения прочность бетонных образцов партии 8 ниже прочности образцов контрольного состава соответственно на 30,8 и 31,2%. И только в возрасте 28 суток прочность бетонных образцов с использованием в качестве ускорителя твердения Cem Fix превышает прочность бетонных образцов контрольного состава и состава с добавкой сернокислого алюминия (партия 5) соответственно на 7,1 и 3,9%.

Результаты исследований показывают, что добавка сернокислого алюминия повышает прочность во все сроки твердения при введении добавки $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ в количестве 1-3%.

Прочность бетонных образцов увеличилась в среднем на 5% по сравнению с прочностью контрольных образцов.

При введении в бетонную смесь $Al_2(SO_4)_3$ в количестве 3%, прочность бетонных образцов по сравнению с прочностью контрольных образцов снизилась на 5% в возрасте 1 суток, в возрасте 3 суток – на 11%, а в возрасте 28 суток – снизилась на 19%.

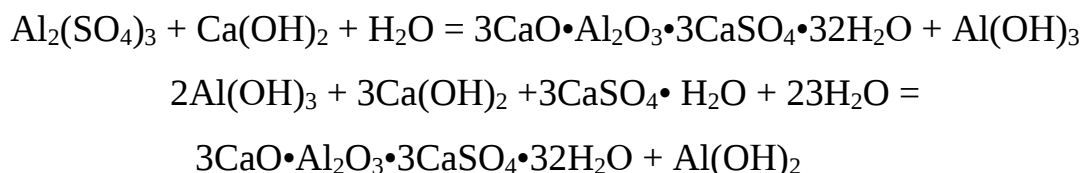
Набор прочности контрольных бетонных образцов и образцов бетона с добавкой сернокислого алюминия высокий. В первые сутки твердения в

нормальных условиях бетон набирает прочность в количестве 41% от марочной прочности.

Увеличение добавки сернокислого алюминия в количестве 3% приводит не к упрочнению, а к разрушению цементного камня, к 28 суткам происходит снижение прочности бетонных образцов.

При использовании в качестве добавки сернокислого алюминия в количестве до 3% происходит ускоряющий эффект на схватывание бетонной смеси. При этом происходит образование высокосульфатного гидросульфоалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (этtringита).

Образование этtringита происходит по реакциям:



Наиболее эффективным ускорителем твердения и набора прочности является сернокислый алюминий в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

При использовании в качестве добавки безводного $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в количестве до 2% прочность бетонных образцов по сравнению с прочностью контрольных образцов нарастает только к 28 суткам.

Таким образом, при использовании в качестве суперпластифицирующей добавки СЕМ Plast и портландцемента Вольского завода для увеличения ранней прочности бетона может быть рекомендован наиболее эффективный сернокислый алюминий в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ в количестве до 3%.

Высокие дозировки сернокислого алюминия приводят к снижению ранней прочности образцов бетона по сравнению с контрольными испытаниями и прочность образцов оказывается ниже контрольной.

Сульфат алюминия возможно использовать для ускорения процесса схватывания и затвердевания бетона. Но как самостоятельный ускоритель он не используется, его можно комбинировать с другими химическими

добавками для достижения желаемого эффекта.

Вывод по главе 3

В данной работе было изучено сочетание добавок: суперпластификатора СЕМ Plast и сульфата алюминия, а также изучено их влияние на прочность бетона и сроки схватывания.

Проведены испытания на рассмотрение вопроса о влиянии сульфата алюминия на прочность бетона, сроки схватывания, определение нормальной плотности цементного теста, а также зависимости между применением сульфата алюминия как ускорителя твердения и ускорителем твердения от фирмы CemFix.

По результатам испытания наиболее эффективной добавкой в бетон стал сульфат алюминия в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Заключение

По результатам проведения исследований выполнены следующие поставленные задачи:

- выполнено исследование основных физико-механических свойств бетонов (прочность, долговечность и т.д.), изучены свойства сульфата алюминия безводного и водного;
- выполнен подбор состава цементной смеси, определена нормальная плотность цементного теста, в том числе с добавками, а также начало и конец сроков схватывания;
- изготовлены бетонные образцы для проведения испытаний на прочность;
- проведены испытания бетонных образцов.

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что после сравнения показателей между сульфатом алюминия $Al_2(SO_4)_3$ и водного сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ наиболее эффективным ускорителем твердения является сернокислый алюминий в виде $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$.

При использовании сульфата алюминия как добавку в бетон улучшилось влияние добавки на нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста, водопотребность бетонной смеси и прочность бетона.

Также было проведено сравнение между образцами с добавлением ускорителя твердения CEM Fix и образцами с добавлением сульфата алюминия. По результатам можно сделать вывод о том, что при добавлении ускорителя прочность на ранней стадии меньше, по сравнению с сульфатом алюминия.

При 2 % добавки сульфата алюминия в бетон повышается прочность бетонных образцов по сравнению с прочностью контрольных образцов. При высоких дозировках прочность бетонных образцов значительно падает.

Сульфат алюминия возможно использовать для ускорения процесса схватывания и затвердевания бетона. Но как самостоятельный ускоритель он

не используется, его можно комбинировать с другими химическими добавками для достижения желаемого эффекта.

Высокие дозировки сернокислого алюминия приводят к снижению ранней прочности образцов бетона по сравнению с контрольными испытаниями и прочность образцов оказывается ниже контрольной.

Также по результатам исследований видно, что добавка сернокислого алюминия повышает прочность во все сроки твердения при введении добавки $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ в количестве до 3%.

Таким образом, при использовании в качестве суперпластифицирующей добавки СЕМ Plast и портландцемента Вольского завода для увеличения ранней прочности бетона может быть рекомендован наиболее эффективный сернокислый алюминий в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ в количестве до 3%.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Баженов, Ю. М. Технология бетона : учебник / Баженов Ю. М. - 5-е издание. - Москва : Издательство АСВ, 2015. – 528 с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд. М.: Стройиздат 1998. – 768 с.
3. Барабанщиков, Ю.Г. Тепловыделение при трении дисперсных систем // Научно-технические ведомости. 2004.№1.С.221-226.
4. Барабанщиков, Ю.Г., Запорожец И.Д. О роли адсорбции воды в тепловыделении цемента // Бетоны для водопропускных сооружений: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1980.С.75-78.
5. Барабанщиков, Ю.Г. К вопросу об особых свойствах граничных слоев воды // Меж.вуз.сб.науч.тр. по гидротехническому и специальному строительству/МГСУ.М.,2002.С.27-32
6. Барабанщиков, Ю.Г. Регулирование сроков схватывания цемента химическими добавками / Ю.Г. Барабанщиков, В.А Соколов, А.С. Васильев, М.В. Шевелев // Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. - . Т., Вып.-С.32-41.
7. Барабанщиков, Ю.Г., Парийский А. А. Влияние добавок на условия образования гидросульфоалюмината кальция // Совершенствование технологии строительного производства :Межвуз. тем. сб. / Томский ун-т. Томск, 1981. С. 131-137.
8. Барабанщиков, Ю.Г., Парийский А.А. К вопросу о кинетике взаимодействия добавок-электролитов с цементом//Бетоны для водопропускных сооружений: Мат.Конф. и совещ. по гидротехнике Л.:Энергия, 1980.С.79-82
9. Брыков, А.С. Гидратация портландцемента в присутствии алюмосодержащих ускорителей схватывания / А.С. Брыков, А.С. Васильев // Ж.прикл.химии. -2013.-Т.86.Вып.6-Сю849-857

10. Васильев, А.С. Влияние алюмосодержащих ускорителей на гидратацию и твердение портландцемента : диссертация ... кандидата технических наук : 05.17.11 / Васильев Андрей Сергеевич; [Место защиты: С.-Петербург. гос. технол. ин-т].- Санкт-Петербург, 2014.- 118 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/2631.
11. ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019. - 13с.
12. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. - М.: Изд-во стандартов, 2019. - 19 с.
13. ГОСТ 22266-2013 Цементы сульфатостойкие. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. - 11 с.
14. ГОСТ Р 56687-2015 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Метод определения сульфатостойкости бетона. — М.: Стандартинформ, 2015. - 8с.
15. ГОСТ 12966-85 Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1999. - 13 с.
16. ГОСТ 3758-75 Реактивы. Алюминий сернокислый 18-водный. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1992. - 8 с.
17. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. - М.: Изд-во стандартов, 2003.- 11 с.
18. ГОСТ 24211-2012. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия — М.: Стандартинформ, 2010. - 16 с.
19. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. - М.: Изд-во стандартов, 2003. - 11 с.
20. ГОСТ 27006-2019 Бетоны. Правила подбора состава. - Введ. 2019 - 06-06. — М.: Стандартинформ, 2019. — 18 с.
21. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. - Введ. 2013-07-01. — М.: Стандартинформ, 2018. — 36 с.

22. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия. - Введ. 2015-04-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.
23. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. - Введ. 2015 - 07-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28с
24. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2018. – 19с.
25. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.
26. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введ. 1995-01-01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 21 с.
27. Изотов, В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона.-М.:Изд-во «Палеотип», 2006.-243 с.
28. Изотов, В.С. Влияние добавок - ускорителей твердения на свойства тяжелого бетона / В.С. Изотов, Р.А. Ибрагимов // Строительные материалы: научно-технический и производственный журнал / гл. ред. Е.И. Юмашева; учредитель ООО Рекламно-издательская фирма "Стройматериалы". – 2010. – №3. – С.35-37.
29. Изотов, В.С., Ибрагимов Р.А. Физико-механические свойства тяжелого бетона, модифицированного новой комплексной добавкой. Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сборник статей VI Международной научно-технической конференции.-Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010.-С.33-35
30. Илясов, А.Г., Медведева И.Н., Корнеев В.И. Ускорители схватывания и твердения портландцемента на основе оксидов и гидроксидов алюминия // Металлург. 2008.№12.С.73-77.
31. Илясов, А.Г. Гидратация и твердение цементов в присутствии тонкодисперсных оксидов- гидроксидов алюминия: дис.... Канд.техн.наук:05.17.11: защищена 2005/А.Г. Илясов. СПб, 2005. 179 с.

32. Парицкая, Н.С. Влияние сульфатов алюминия и железа на различные виды коррозии цементных материалов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.17.11 / Парицкая Наталья Сергеевна; [Место защиты: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)]. — Санкт-Петербург, 2020. — 20 с.
33. Ребиндер П.А., Сегалова Е.Е., Алинина Е.А., Андреева Е.Н. Физико-механические основы гидратаци-онного твердения вяжущих веществ. Шестой международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиз-дат, 1976. Т. 2. Кн. I.
34. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
35. Рамачандран В., Фельдмин Р., Бодуэн Р. Добавки в бетон : монография. М.: Стройиздат, 1988. 575 с.
36. Ушеров-Маршак, А.В Современный бетон и его технологии:. М.: Стройиздат, 1988. 30 с.
37. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8-12.
38. Angelskaar T. Cement accelerator and method// Пат. US2006210716(США), МПКВ05D 7/00. Оп. 21.09.2006.
39. Lindlar B., Wombacher F., Schurch H., Mader U. Water-based setting and hardening accelerator for hydraulic binders and process for producing it // Пат. US20110017100 (США), МПК C04B 22/04. Оп. 27.01.2011.
40. Melbye T., Dimmock R., Garshol K.F. Sprsyed concrete for rock support / MBT International Underground Construction Group, Division of MBT Ltd/ Switzerland, 2001., 247 p.
41. Myrdal R. Accelerating admixtures for concrete/ State of the art//SINTEF report № SBF BK A07025, Trondheim, 2007.35 p.
42. Rixom R., Mailvaganam N. Chemical Admixtures for Concrete. E&FN Spon, London, 1999. 446 p.

43. Sommer M., Mader U., Wombacher F., Lindlar B. Solidification and hardening accelerator for hydraulic binding agents and method for the production thereof // Пат. US0080110375 (CIIA), МПК C04B 24/00. Оп. 15.05.2008.

44. Weibel M. Stable Sprayed Concrete Accelerator Dispersion Having A High Active Substance Content // Пат. US20100003412 (CIIA), МПК B05D 3/10. Оп. 07.02.2010.