

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 «Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона на  
композиционных вяжущих»

Студент

С.А. Власов

(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 Современные представления о структуре и свойствах самоуплотняющегося бетона.....	6
1.1 Состав, структура и свойства самоуплотняющегося бетона.....	6
1.2 Роль минеральных добавок и наполнителей в структуре самоуплотняющихся бетонных смесей.....	22
1.3 Значение суперпластификаторов в составе самоуплотняющихся бетонных смесей .....	31
2 Методы испытаний и характеристика используемых материалов .....	35
2.1 Методы исследования.....	35
2.2 Используемые материалы .....	40
2.2.1 Цемент .....	40
2.2.2 Заполнители .....	41
2.2.3 Минеральные наполнители .....	43
2.2.4 Гиперпластификаторы .....	46
3 Свойства самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих .....	48
3.1 Физико-механические свойства СУБ на композиционных вяжущих .....	48
3.2 Эксплуатационные свойства самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих .....	63
3.2.1 Морозостойкость бетонов .....	63
3.2.2 Коррозионная стойкость бетонов.....	65
Заключение .....	67
Список используемых источников.....	69

## Введение

**Актуальность работы.** В последнее время в строительной области с каждым годом все больше внимания уделяется энерго- и ресурсо-эффективным материалам. Так, в современном строительстве зданий и сооружений из монолита все шире применяются высокотехнологичные бетонные смеси, способные без применения какого-либо внешнего механического воздействия самостоятельно заполнять опалубку, в том числе густоармированную, либо со сложной геометрической формой, сохраняя при этом связность и однородность, которые получили название - самоуплотняющиеся бетоны (СУБ).

За счет своих свойств и структуры, самоуплотняющиеся бетоны решают сразу две проблемы в строительстве: обладают более высокими прочностными свойствами в сравнении с тяжелым бетоном, а также позволяют сократить сроки строительства и трудозатраты. Помимо вышесказанного, такие бетоны обладают высокой удобоукладываемостью и быстрыми темпами набора прочности, что позволяет их отнести к классу «высокофункциональных бетонов». Это обеспечивается за счет применения комплекса модификаторов, включающих, как правило, эффективные разжижители, модификаторы вязкости, активные минеральные добавки (наполнители), ускорители твердения.

На территории РФ к настоящему времени применение СУБ по-прежнему затруднено; это связано со сложностью организации производства такого бетона, а также с полным отсутствием развитой базы нормативных документов. Подытожив все сказанное выше, можно сделать вывод, что проблема широкого применения самоуплотняющегося бетона на территории РФ является актуальной на сегодняшний день.

**Цель исследования** – оптимизация состава самоуплотняющегося бетона на основе композиционных вяжущих и исследование его свойств.

**Предметом исследования** диссертационной работы являются

процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры и свойств самоуплотняющихся бетонов.

**Объект исследования** диссертационной работы – самоуплотняющийся бетон на основе композиционных вяжущих.

Для достижения поставленной цели были определены **следующие задачи:**

1. Обобщить теоретические аспекты в технологии повышения прочности самоуплотняющегося бетона;
2. Обобщить характеристики применяемых материалов и методы экспериментальных исследований;
3. Исследовать влияние гранулометрического состава мелкого заполнителя, суперпластификаторов и минеральных добавок на свойства самоуплотняющегося бетона;
4. Оптимизировать состав самоуплотняющегося бетона на основе композиционных вяжущих.

**Методы исследования** - подбор состава и исследование свойств бетонной смеси осуществлялись в соответствии с ГОСТ 27006-86. «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия» и ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Исследование свойств самоуплотняющегося бетона проводилось в соответствии с ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 12730.0-78. «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, пористости и водонепроницаемости», ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

**На защиту выносятся:**

1. Современное состояние вопроса применения самоуплотняющегося бетона на композиционных вяжущих;
2. Исследование свойств самоуплотняющегося бетона на основе композиционных вяжущих;

3. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона с применением различных минеральных добавок и современных суперпластификаторов.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

1. Представлен сравнительный анализ влияния суперпластификаторов и минеральных добавок на свойства самоуплотняющегося бетона;
2. Разработан оптимальный состав самоуплотняющегося бетона на основе композиционного вяжущего.

**Практическая значимость** заключается в разработке оптимального состава самоуплотняющегося бетона на основе композиционных вяжущих; и в дальнейшем применении этого бетона строительными организациями.

**Апробация результатов** исследования.

По теме диссертационного исследования опубликовано 2 статьи:

1. Шишканова В.Н., Власов С.А. Композиционные вяжущие для самоуплотняющихся бетонов / В.Н. Шишканова, С.А. Власов // Научно-методический журнал «Наука и образование: новое время», №4, 2019г.
2. Шишканова В.Н., Власов С.А. Повышение прочности самоуплотняющегося бетона на композиционных вяжущих введением минеральных наполнителей / В.Н. Шишканова, С.А. Власов // Межотраслевой научно-информационный центр, Конференция МК-14 20, 2020г.

**Структура работы.** Состав диссертационной работы включает: введение, три главы по теме исследования, заключение, библиографический список литературы. Объем работы составляет 73 страницы.

# **1 Современные представления о структуре и свойствах самоуплотняющегося бетона**

## **1.1 Состав, структура и свойства самоуплотняющегося бетона**

Строительная область в современном мире не стоит на месте и постоянно развивается. По степени развития строительной области можно судить о степени развития государства в целом, так как она оказывает значительное влияние, как на экономику государства, так и на уровень жизни населения. Поэтому вектор развития данной области сейчас направлен в первую очередь на создание новых энергоэффективных строительных материалов и инновационных технологий, позволяющих снизить стоимость строительства, не теряя при этом в качестве.

На данный момент, по данным Федеральной службы государственной статистики РФ, на территории Российской Федерации около 82% жилищного фонда составляют дома возведенные из кирпича и сборного железобетона. В последнее время набирают популярность дома, возведенные из монолитного железобетона. По сравнению с домами из кирпича или сборного железобетона, здания из монолитного железобетона имеют большую прочность, трещино-, жаро- и влагостойкость. Но темп развития монолитного строительства по-прежнему имеет медленный характер, так как данный вид строительства имеет более высокую стоимость, по сравнению со сборным или кирпичным домостроением.

На проблему высокой стоимости монолитного строительства обратили внимание японские ученые в 1980ых годах. В то время в Японии заметили интенсивное снижение количества квалифицированных рабочих в области строительства, что впоследствии привело к снижению качества жилищного домостроения. Так японский ученый Хайим Окамура в 1986 году впервые предложил идею создания бетона, который бы уплотнялся под собственным весом. Такой бетон помог бы сразу решить две проблемы - уменьшить стоимость строительства за счет снижения количества неквалифицированных

рабочих, участвующих в строительном процессе, и при этом увеличить основные характеристики изделий и сооружений из монолитного бетона. Создание такого вида бетонов стало возможным благодаря внедрению в строительную среду нового поколения суперпластификаторов, основой для которых служили полиакрилаты и полиарбоксилаты.

Первый образец такого бетона был представлен японскими учеными в 1988 году. Ученые дали ему название - Self-Compacting Concrete, что в переводе на русский язык - самоуплотняющийся бетон (сокращенно СУБ). В своей научной работе «Mix Design For Self-Compacting Concrete» [16] Х. Окамура приводит следующее определение самоуплотняющегося бетона: самоуплотняющийся бетон - это бетон, который без воздействия внешних нагрузок способен уплотняться за счет своего собственного веса и высокой подвижности смеси. Состав самоуплотняющегося бетона в целом идентичен классическому тяжелому бетону (цемент, мелкий заполнитель, крупный заполнитель, вода и возможные добавки), отличается лишь процентное соотношение материалов. Остаточный объем пор в СУБ не превышает объем обычного бетона.

Вскоре СУБ стал стремительно набирать популярность в строительной среде Японии. Одним из первых случаев его применения было возведение стен для крупного водохранилища в июне 1998 года; при помощи СУБ удалось сократить сроки строительства с 22 месяцев до 18, то есть примерно на 20%. При этом количество рабочих сократилось от 150 до 50 человек (снижение на 66%). Так же одним из первых случаев применения самоуплотняющегося бетона является строительство мостовой системы «Akashi-Кауко» в 1998 году, в Японии (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Мостовая система «Akashi-Кауко» в Японии

Такие результаты не могли быть оставлены без внимания и для остального мира. И уже ближе к 2000-ым годам началось тщательное изучение самоуплотняющихся бетонов в странах старого света. К примеру, в Индии СУБ впервые использовался в 2003 году при строительстве высокоскоростной эстакады в Мумбаи. Длина эстакады составляла 2300 м, а ширина полосы 16 м. Прочность бетона на сжатие по проекту составляла 75 МПа, а подвижность растворной смеси - 70 см.

Если рассматривать наше время, то одним из примеров использования самоуплотняющегося бетона в Европе является диспетчерская вышка аэропорта «Arlanda», Стокгольм, Швеция (рисунок 1.2). Благодаря использованию СУБ, удалось снизить уровень шума, что позволило осуществлять строительство не только в дневное, но и в ночное время.



Рисунок 1.2 - Диспетчерская вышка аэропорта «Arlanda», Стокгольм,  
Швеция

В наше время самоуплотняющийся бетон используют и в странах нового света. Так при строительстве «Trump Tower» в США (рисунок 1.3), для заполнения густоармированной опалубки использовали СУБ.

Отличительной особенностью самоуплотняющихся бетонов является - высокая удобоукладываемость бетонной смеси, которая сочетает в себе две противоположные по природе характеристики: низкое предельное напряжение сдвигу, которое предопределяет высокую текучесть смеси, и повышенную вязкость, которая обеспечивает стабильность и связность смеси.



Рисунок 1.3 - Здание «Trump Tower», Нью-Йорк, США

«Заполняющая способность обеспечивается повышенной деформируемостью цементной пасты, что достигается применением эффективных суперпластификаторов, оптимальным водовязущим отношением, использованием минеральных добавок (наполнителей) с непрерывной гранулометрией» [16, 36]. «При этом дисперсные частицы размером менее 90 мкм в количестве 500-600 кг/м<sup>3</sup> обеспечивают стойкость бетонной смеси к расслоению» [11, 35, 36].

«Для повышения способности бетонной смеси преодолевать препятствия необходимо, прежде всего, оптимизировать гранулометрический состав заполнителей, уменьшить расход крупного и увеличить соответственно расход мелкого заполнителя, ограничить максимальный размер зерен крупного заполнителя и увеличить содержание цементной пасты, обеспечивая тем самым обмазку зерен для снижения трения» [39, 41].

В работе «Self-Compacting High Performance Concrete» Окамура приводит следующие значения для самоуплотняющейся бетонной смеси:

«предельное напряжение сдвига для нее составляет менее 60 Па, что значительно меньше, чем у смеси для тяжелых бетонов (100-1000 Па), при этом вязкость смеси - 20-200 Па·с, примерно близка к тяжелым бетонам» [34].

Обобщая всё вышесказанное, к основным достоинствам самоуплотняющегося бетона можно отнести:

- отсутствие потребности в вибрировании, при укладке бетона;
- высокая удобоукладываемость смеси (пластичность и подвижность), за счет которой бетонная смесь легко заполняет опалубку даже в густоармированных случаях;
- за счет высокой удобоукладываемости смеси, присутствует возможность создания изделий всевозможных архитектурных форм;
- благодаря своей плотной структуре обладает минимальным количеством пустот;
- повышенные показатели по прочности;
- использование самоуплотняющихся бетонов позволяет сокращать количество рабочих, участвующих в строительном процессе, и соответственно снижаются трудозатраты;
- использование самоуплотняющихся бетонов позволяет сокращать длительность строительства в пределах 20% от общего срока;
- отсутствие потребности в вибрировании при укладке бетона приводит к снижению уровня шума и повышению безопасности строительного процесса.

К недостаткам самоуплотняющихся бетонов относят:

- стоимость самоуплотняющегося бетона выше, чем у тяжелого бетона, вследствие более модифицированного состава смеси;
- для осуществления укладки такого бетона требуется положительная температура окружающей среды;
- опалубка для таких бетонов должна быть спроектирована с учетом более высокого давления смеси на нее;

- самоуплотняющийся бетон требует за собой больше ухода, в сравнении с тяжелым бетоном;

- сниженный модуль упругости (примерно на 15% ниже обычного).

Если рассматривать Россию то, к настоящему времени широкое применение СУБ по-прежнему затруднено; это связано в первую очередь со сложностью в организации производства такого бетона, и с полным отсутствием развитой базы нормативных документов.

Подбор состава смеси для самоуплотняющихся бетонов, осуществляется по тому же принципу что и для классических, то есть в 5 этапов. Алгоритм подбора смеси схематично показан на рисунке 1.4.

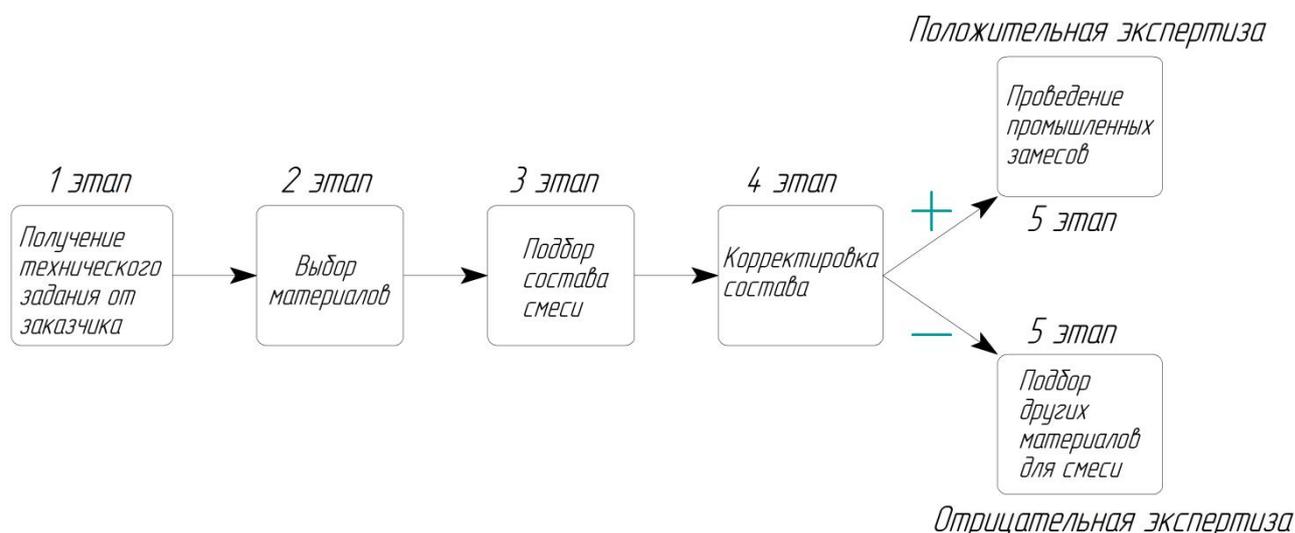


Рисунок 1.4 - Алгоритм подбора состава бетонной смеси

Самоуплотняющиеся бетоны в зависимости от состава материалов подразделяют на 3 типа:

1 - порошкового типа: данному типу характерно низкое отношение воды к вяжущему и высокое содержание дисперсных материалов, способствующих повышению пластической вязкости;

2 - бетоны с модификаторами вязкости: для таких смесей расход суперпластификатора больше чем для первого типа, а также они требуют более высокое отношение воды к вяжущему, для обеспечения заполняющей способности;

3 - комбинированного типа: это бетоны первого типа с добавкой модификатора вязкости.

Так как самоуплотняющийся бетон появился на строительном рынке относительно недавно, для различных стран характерно свое видение по его применению. К примеру, в зависимости от страны, процентное соотношение материалов бетонной смеси может различаться. В таблице 1.1 приведены стандарты составов самоуплотняющейся бетонной смеси для Японии, Индии, США и стран Европы.

Таблица 1.1 - Варианты состава СУБ

Компоненты	Расход составляющих на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси
<b>Япония</b>	
Вода, кг	174
Портландцемент, кг	529
Зола, кг	71
Мелкий заполнитель, кг	750
Крупный заполнитель, кг	790
Добавка суперпластификатор, кг	10
<b>Европа</b>	
Вода, кг	191
Портландцемент, кг	279
Известковый наполнитель, кг	246
Мелкий заполнитель, кг	866
Крупный заполнитель, кг	749
Добавка суперпластификатор, кг	4,1
<b>США</b>	
Вода, кг	179
Портландцемент, кг	358
Гранулированный шлак, кг	120
Мелкий заполнитель, кг	935
Крупный заполнитель, кг	683
Добавка суперпластификатор, мл	2500
<b>Индия</b>	
Вода, кг	164
Портландцемент, кг	331
Зола, кг	151
Мелкий заполнитель, кг	918
Крупный заполнитель, кг	768
Добавка суперпластификатор, мл	2300

Из приведенной таблицы 1.1, определим среднее значение для каждого из материалов.

Среднее процентное соотношение материалов по массе приводится на рисунке 1.5.

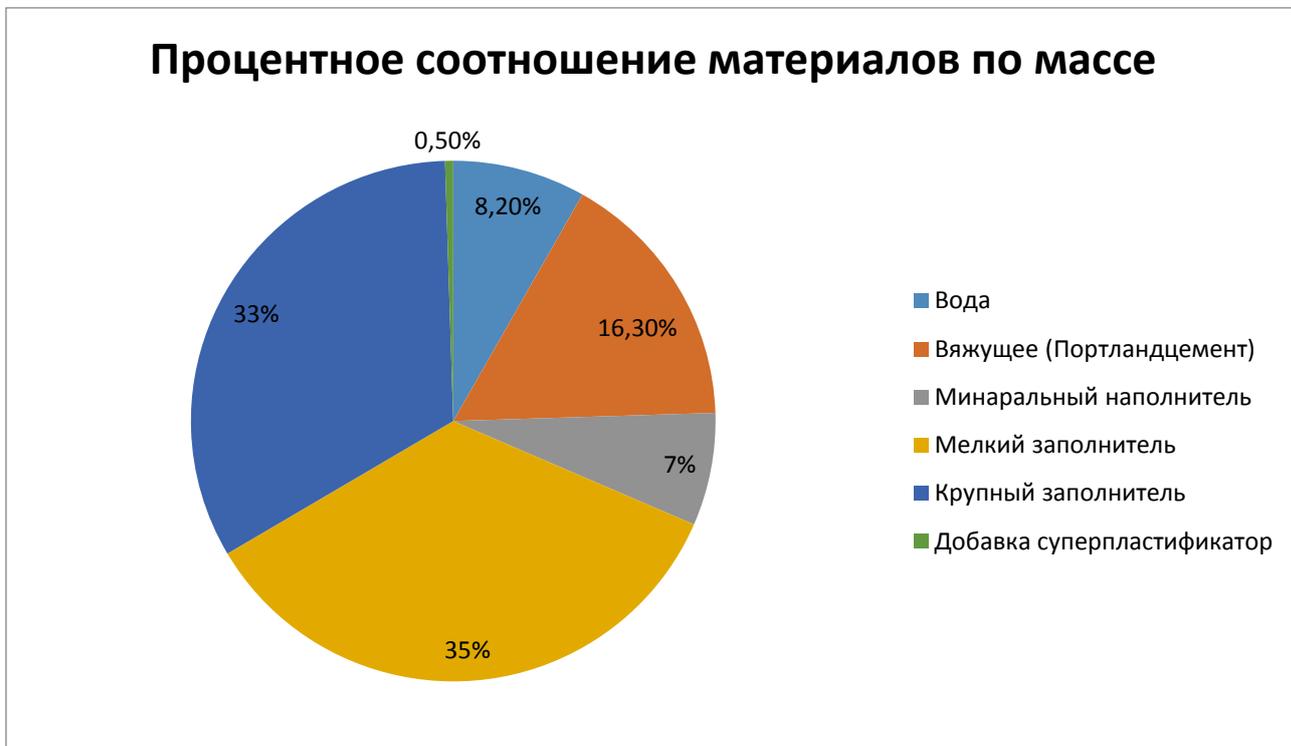


Рисунок 1.5 - Среднее процентное соотношение материалов по массе в составе самоуплотняющейся бетонной смеси

Из диаграммы видно, что:

- водоцементное отношение в среднем составляет  $8,2/16,3 = 0,503$ ;
- объем заполнителя крупной фракции не составляет больше 50%;
- средняя объемная часть песка составляет около 35%;
- объем минерального наполнителя в среднем не превышает 10%;
- добавка суперпластификатор в среднем не превышает 1% по объему.

Рассмотрим каждый компонент смеси по отдельности.

1) Вяжущее:

Основным вяжущим материалом для СУБ является портландцемент. Отличительной особенностью портландцемента является его сложная минеральная структура; в его составе присутствуют алюминий, железо,

кремний и оксид кальция. В качестве альтернативы также может использоваться сульфатостойкий цемент. Замена обычного цемента в составе бетона на композиционное вяжущее с различными добавками позволяет увеличить время начала и окончания схватывания примерно в 2-3 раза, что является существенным плюсом, так как появляется возможность транспортировать бетонную смесь на большие расстояния. Кроме этого добавление в состав бетонной смеси минеральных добавок позволяет существенно снизить расход цемента. Чтобы достичь максимальных показателей по прочности и плотности для бетонной смеси необходимо оптимизировать соотношение цемента и песка, при водоцементном отношении В/Ц=0,5 и выше.

Благодаря композиционным вяжущим удастся сократить время ухода за бетоном в зимних условиях, а так же сократить количество технологических перерывов, которые назначаются как правило для того чтобы бетон смог набрать прочность. В жаркое время года время ухода за свежееуложенным бетоном также сокращается, и как следствие уменьшаются затраты труда, расход воды необходимой для ухода за бетоном и так далее. На сегодня, в мире уже присутствует достаточно большое количество предприятий, производящих выгодные в экологическом и экономическом плане композиционные вяжущие.

Не стоит забывать, что при выборе вяжущего для бетонной смеси, нужно в первую очередь определиться с назначением конструкции, что тоже значительно влияет на его выбор.

## 2) Заполнители:

Пески отличаются по двум основным показателям: зерновому составу и форме зерен. Именно эти два показателя определяют влияние песка на свойства бетонной смеси и расход цемента в бетоне. Расход цемента увеличивается прямо пропорционально удельной поверхности и пустотности песка. Расходы цемента на природном кварцевом песке несколько меньше по

сравнению с дробленным песком. Это находит свое объяснение в меньшей пустотности и удельной поверхности природного песка.

Контакты между зернами заполнителя и цементным камнем в основном ровные, четко выраженные. Только в тех случаях, когда зерно плагиоклаза сильно серицитизировано, наблюдается расплывчатый контакт за счет наложения зерен кальцита и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Расплывчатые контакты наблюдаются иногда и на границе с зернами кварца. «Для сложных структур (граниты, порфириды, песчаники и др.) величина сил сцепления будет зависеть от количества отдельных минералов на поверхности заполнителя и от их физико-химической активности» [43].

Для того чтобы получить самоуплотняющийся бетон постоянного качества следует с особым вниманием контролировать и учитывать гранулометрический состав его заполнителей. Отличие СУБ от тяжелого бетона состоит в том, что он более чувствителен к колебаниям рецептуры и значительное влияние на него оказывает содержание влаги в окружающей среде, а также содержание влаги в заполнителях. Для контроля влажности и водоцементного отношения СУБ их рекомендуют хранить на закрытых складах. Когда мы определяем состав смеси необходимо также уделить внимание и форме мелкого заполнителя. Для самоуплотняющегося бетона рекомендованная форма заполнителя - окатанная, так как она уменьшает вероятность его упорядоченности и тем самым увеличивает расплыв смеси.

Для крупного заполнителя рекомендуется применять щебень фракции 10-16, 16-20 мм из метафорических горных пород. Для мелкого заполнителя рекомендуется использовать кварцевый песок с крупностью заполнителя не более 0,125 мм.

### 3) Минеральный наполнитель:

При проектировании самоуплотняющегося бетона одной из наиболее главных задач, с которыми приходится сталкиваться является - обеспечение достаточно высокой раздвижки зерен мелкого и крупного заполнителя. Если эта задача не будет решена, то при введении в бетонную смесь

высокоэффективных суперпластификаторов, будет наблюдаться расслоение бетонной смеси (сегрегация).

Для того чтобы решить эту задачу, в состав бетонной смеси вводят тонкий наполнитель, который по дисперсности был бы близок к вяжущему веществу. Количество этого наполнителя должно быть сопоставимо с расходом вяжущего цемента. Не смотря на значительный объем вводимого инертного материала (наполнителя), он никак не приводит к потере прочности в бетоне; достигается это за счет того, что в самоуплотняющихся бетонах значительно более низкое водоцементное отношение в сравнении с литыми бетонами.

То есть основное назначение минерального наполнителя в составе бетонной смеси - это обеспечение получения высокоподвижной бетонной смеси, стойкой к расслоению. Крупность минерального наполнителя, как правило, не превышает 0,125 мм. Более подробно роль минеральных добавок в структуре СУБ рассматривается в пункте магистерской диссертации 1.2.

#### 4) Суперпластификаторы:

Самоуплотняющийся бетон, так же как и классический не обходится без специальных добавок - суперпластификаторов. Данные добавки в бетонной смеси служат для того чтобы снизить трение между его составляющими. Для того чтобы регулировать свойства самоуплотняющейся бетонной смеси в её состав добавляют специальные пластифицирующие добавки, а именно суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилата. Суперпластификатор принято добавлять в состав бетонной смеси в объеме 1% от массы вяжущего вещества. Данный вид добавок обеспечивает жизнеспособность, и стабильность бетонной смеси. Более подробно значение суперпластификаторов в структуре СУБ рассматривается в пункте магистерской диссертации 1.3.

Главным показателем качества бетона по-прежнему считается его прочность и долговечность. Под прочностью бетона понимается его способность сопротивляться действующим на него статическим и

динамическим нагрузкам. Первостепенными свойствами, обеспечивающими долговечность бетона, являются его морозостойкость, коррозионная стойкость и водонепроницаемость.

Морозостойкость - сопротивление бетона попеременному (циклическому) замораживанию и оттаиванию вследствие изменения температуры окружающей среды и возникновения в теле бетона напряжений, создаваемых замерзающей и расширяющейся водой. Чем больше циклов способен выдерживать бетон, тем лучше его качество. Классификация марок и классов бетонов по морозостойкости приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Классификация бетонов по морозостойкости

Класс бетона	Марка бетона	Морозостойкость, F
B7,5	M100	F50
B12,5	M150	F50
B15	M200	F100
B20	M250	F100
B22,5	M300	F200
B27,5	M350	F200
B30	M400	F300
B35	M450	F200-F300
B40	M550	F200-F300

Водонепроницаемость - способность бетона сопротивляться давлению проникающей в него лишней воды. В ГОСТ 12730.5-84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» приводится следующая классификация бетонов по водонепроницаемости, которая представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Классификация бетонных смесей по водонепроницаемости

Условные обозначения	Показатели проницаемости бетона			
	Прямые		Косвенные	
	Марка бетона по водонепроницаемости	Коэффициент фильтрации, см/с	Водопоглощение, % по массе	В/Ц отношение не более
Н-бетон нормальной проницаемости	W4	Св. $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	Св. 4,7 до 5,7	0,6
П-бетон пониженной проницаемости	W6	Св. $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	Св. 4,2 до 4,7	0,55
О-бетон особо низкой проницаемости	W8	Св. $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	До 4,2	0,45
	W10-W14	Св. $5 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$		0,35
	W16-W20	Менее $5 \cdot 10^{-11}$		0,30

В 2004-ом году пять европейских строительных организаций (CEMBUREAU, ERMCO, EFNARC, EFCA, BIMB) объединились в ученую группу, чтобы подготовить документ, который бы собрал все накопленные знания о самоуплотняющемся бетоне. Документ получил название «European Guidelines for Self-Compacting Concrete». В этом документе группа ученых представила классификацию бетонных смесей для приготовления СУБ, приведенную в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Европейская классификация для приготовления СУБ

Название бетонной смеси	Обозначение	Чем характеризуется	Значение величины
Высокоподвижная	SF1	Расплыв конуса (подвижность)	550 - 650 мм
	SF2		660 - 750 мм
	SF3		760-850 мм
Вязкая	VS1/VF1	Вязкость	$\leq 2$ секунд/8 секунд
	VS2/VF2		$> 2$ секунд/9 - 25 секунд
Легкоформируемая	PA1	Проникающая способность	Зависит от армирования сооружения
	PA2		
Устойчивая к расслоению	SR1	Расслаиваемость	$< 20\%$
	SR2		$< 15\%$

Так из таблицы 1.4 видно, что самоуплотняющиеся бетоны классифицируют по четырем основным классам - подвижность, вязкость, проникающая способность, стойкость к сегрегации:

1) Подвижность. Маркируется как SF. Данный параметр характеризует текучесть бетонной смеси. Подвижность самоуплотняющихся бетонных смесей значительно больше, чем в классическом бетоне. Значения подвижности для самоуплотняющейся бетонной смеси колеблются от 520 мм до 900 мм. Определение данного параметра производят классическим методом, путем измерения расплыва конуса бетонной смеси. По результатам испытаний бетонной смеси на расплыв можно судить о соответствии её консистенции техническим требованиям. Также в ходе испытаний на подвижность можно получить информацию об однородности смеси, а также стойкости к сегрегации, путем измерения времени расплыва.

По подвижности SF самоуплотняющиеся бетонные смеси делятся на два класса:

- первый класс SF1 (расплав 550-650 мм) рекомендуется для слабоармированных железобетонных конструкций или для конструкций без арматуры, которые формируются в вертикальной опалубке (пример - стеновые панели), для конструкций которые формируются литьем под давлением бетононасоса (пример - элементы тоннелей);

- второй класс SF2 (расплав 660-750 мм) рекомендуется для классических ж/б конструкций, таких как колонны, сваи, перекрытия и так далее;

- третий класс SF3 (расплав 760-850 мм) рекомендуется для элементов с густым армированием и сложной геометрической формой (пример - опорные плиты технологического оборудования). Данный класс получают при помощи заполнителя с максимальной крупностью зерен менее 20 мм.

2) Вязкость. Маркируется как VS/VF, где VS - время  $T_{500}$ , за которое бетонная смесь, подаваемая через конус, достигает расплыва равного 50 см; VF - время, за которое бетонная смесь проходит через V-образную воронку.

Полученные в результате этого испытания значения времени не характеризуют непосредственно вязкость самоуплотняющейся бетонной смеси, но косвенно связаны с ней. Эти значения характеризуют скорость потока вытекающей смеси. К примеру, смесь с низкой вязкостью имеет высокую начальную скорость потока, которая резко уменьшается; а смесь с высокой вязкостью продолжает растекаться в течение длительного времени.

Классов по вязкости VS/VF - два:

- первый класс VS1/VF1. Данному классу характерна хорошая способность к заполнению густоармированных конструкций, однако смеси данного класса подвержены сегрегации. Смеси данного класса рекомендуют для использования в конструкциях, не требующих отделки;

- второй класс VS2/VF2. Смеси данного класса имеют повышенные показатели по времени растекания. У данных составов, как правило, обнаруживается тиксотропный эффект, благодаря которому происходит снижение давления на опалубку, и повышение стойкости к расслоению.

3) Проникающая способность. Маркируется как PA. По проникающей способности смеси делятся на 2 класса:

- первый класс PA1. Рекомендуются для конструкций с шагом армирования 80 - 100 мм (к примеру, конструкции гражданского строительства);

- второй класс PA2. Рекомендуются для конструкций с шагом армирования 60 - 80 мм (к примеру, конструкции инженерных сооружений).

4) Устойчивость к сегрегации. Маркируется как SR, определяется пропуском смеси через сито. По устойчивости к сегрегации смеси делятся на 2 класса:

- первый класс SR1, с показателями расслаиваемости  $\leq 20\%$ ;

- второй класс SR2, с показателями расслаиваемости  $\leq 15\%$ .

## **1.2 Роль минеральных добавок и наполнителей в структуре самоуплотняющихся бетонных смесей**

Как было сказано ранее, основной задачей минеральных добавок в структуре СУБ является обеспечение стойкости бетонной смеси к расслоению. Минеральные добавки, как правило, представляют собой полисахариды, которые включают производные целлюлозы и акриловые полимеры. В зависимости от случая механизм их действия различается. Механизм действия минеральных добавок состоит в том, что они адсорбируются (поглощаются) на частицах цемента и повышают вязкость, вследствие межчастичного притяжения. Бетонная смесь, в которую ввели модификатор вязкости, начинает проявлять эффект разжижения, в результате чего кажущаяся вязкость смеси уменьшается с увеличением скорости сдвига. При этом модифицирующее действие стабилизирующих органических добавок исчерпывается на стадии бетонных смесей.

Реологические свойства бетонной смеси способны повышать как тонкодисперсные минеральные добавки, так и органические добавки загустители, но между ними есть разница; тонкодисперсные минеральные добавки помимо этого способны повышать физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики, поэтому при проектировании смеси рекомендуют выбирать именно их. Благодаря совместному применению минеральных добавок и суперпластификаторов удается получить бетоны с высокой прочностью на сжатие (до 65 МПа).

В зависимости от показателя дисперсности минеральные добавки разделяют на:

- добавки разбавители цемента, близкие по своему гранулометрическому составу к цементу: зола уноса, молотый доменный гранулированный шлак и т.д.;

- добавки уплотнители, такие как микрокремнезем, метакаолин, которые имеют размер частиц примерно в 100 раз меньше зерен цемента и обладают удельной поверхностью 20-30 м<sup>2</sup>/г .

Добавление минеральных наполнителей в состав бетонной смеси оказывает благоприятное влияние на различные свойства СУБ, что связано с физическим эффектом, который проявляется в том, что мелкие частицы обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент. Также благоприятное влияние может быть вызвано реакциями активных гидравлических составляющих.

Помимо вышесказанного, минеральные наполнители способны оказывать влияние на степень гидратации портландцемента, проницаемость бетона, сопротивление трещинообразованию при тепловой обработке, сопротивление агрессивным щелочным средам.

На рисунке 1.6 приводится действующая классификация активных минеральных добавок по ГОСТ 24640-91, а также классификация минеральных добавок с учетом происхождения (генезиса) и роли в процессе гидратации и твердения.

На рисунке красной рамкой выделена классификация, которая приводится в ГОСТ 24640-91, а зеленой рамкой выделена классификация комитета RILEM (Международный союз лабораторий и экспертов в области строительных материалов, систем и конструкций) для минеральных добавок техногенного происхождения.

Не смотря на такое большое количество минеральных добавок, их выбор при изготовлении бетонной смеси не всегда обоснован. Недостаточно исследована оптимальная степень замены портландцемента данными добавками в составе самоуплотняющегося бетона.

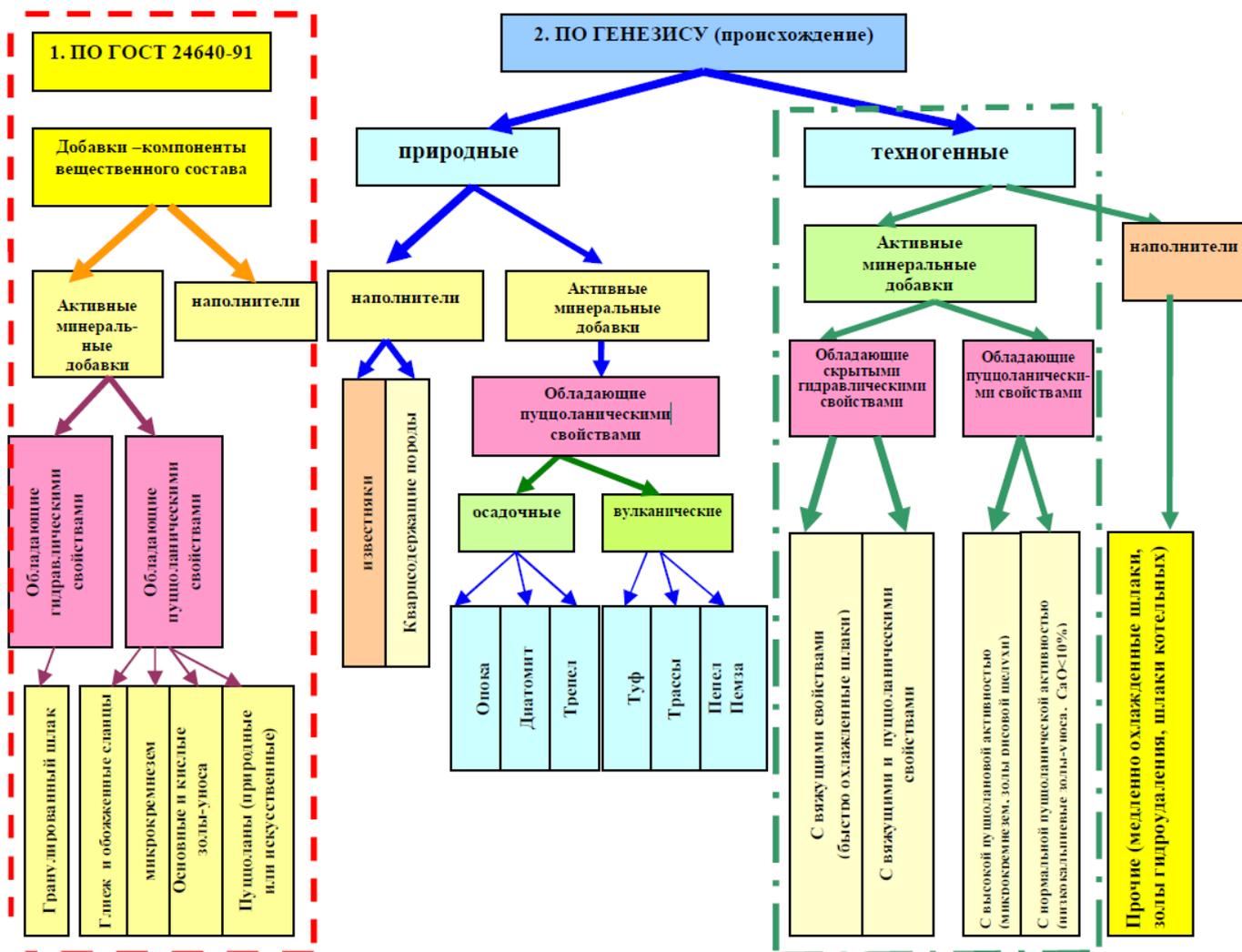


Рисунок 1.6 - Действующая классификация минеральных добавок

Рассмотрим одни из наиболее часто встречающихся минеральных добавок, некоторые из которых использовались в экспериментальных исследованиях, указанных в главе 3 магистерской диссертации.

### 1) Микрокремнезем:

Микрокремнезем является одним из наиболее используемых минеральных наполнителей для получения бетонов высокого качества. Микрокремнезем относят к ультрадисперсным минеральным добавкам.

Крупность микрокремнезема составляет 0,1 микрона (0,0001 мм), что в 100 раз меньше среднего размера зерна цемента. Частицы микрокремнезема обладают ровной гладкой поверхностью и сферической формой. Распределяясь в общем объеме цементной дисперсии, частицы микрокремнезема взаимодействуют с более крупными частицами и образуют

трехмерный пространственный каркас. Каркас состоит из множества цепочек и агрегатов с многочисленными коагуляционными контактами. «В результате существенно изменяются реологические свойства: повышаются структурная и пластическая вязкость, когезия и тиксотропные свойства смесей, как следствие усиления межчастичных взаимодействий» [13].

Профессора Ю.М. Баженов и Е.М. Чернышов в своей работе «Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы» приводят мысль о том, что «основная структурная роль микронаполнителя как раз состоит в уплотнении системы твердеющего цемента» [38]. «На структурном уровне цементирующих веществ ультрадисперсные минеральные добавки (частицы, размер которых на один-два порядка меньше, чем цемент), например микрокремнезем, кроме этой прямой функции выполняют также физико-химическую структурообразующую функцию» [38].

Основным компонентом отхода для микрокремнезема является диоксид кремния (90 – 92%) в аморфной форме.

Микроструктура частиц микрокремнезема представлена на рисунке 1.7.

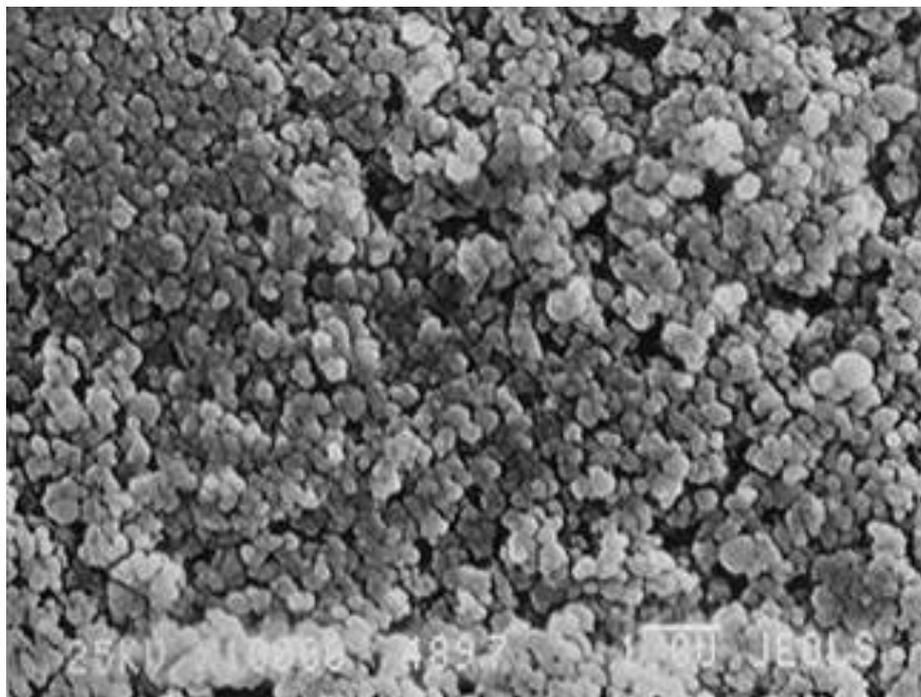


Рисунок 1.7 - Микроструктура микрокремнезема  
(увеличено в 10 000 раз)

Микрокремнезем в сочетании с эффективными суперпластификаторами, при оптимальной дозировке способствует уменьшению расхода цемента до 200 – 450 кг/м<sup>3</sup>, придает высокую прочность бетону на сжатие (до 80 МПа), что повышает долговечность бетонов за счет снижения водонепроницаемости и увеличения антикоррозионной стойкости.

Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроксидом кальция Ca(OH)<sub>2</sub>, образующейся при гидратации портландцемента в процессе гидратации вяжущих соединений. Благодаря высокой чистоте и повышенной дисперсности микрокремнезема, он способствует увеличению эффективности и скорости реакции, что зависит от содержания реактивного кремнезема. В работе М.Н. Путиловой «Исследование и оптимизация состава мелкозернистого бетона» было проведено исследование влияния активной минеральной добавки микрокремнезема и эффективного суперпластификатора Sika Viskocrete 25 RU на прочностные характеристики цементного камня. При изготовлении бетонных образцов в качестве крупного заполнителя был использован гранитный щебень фракции 5-10 мм, в качестве мелкого заполнителя - дроблёный песок из гранита. В качестве вяжущего использовался нормальнотвердеющий портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. Микрокремнезём вводился в состав смеси в количестве 10, 20 и 30% от массы цемента. В состав каждой из смесей данной партии также вводился суперпластификатор Sika Viskocrete 25 RU в количестве 1% от массы цемента. Твердение образцов бетона происходило при нормальных условиях в течение, а результаты фиксировали при 7, 14 и 28 суток.

Прочности образцов в 28-суточном возрасте составляют: при содержании микрокремнезема в количестве 10, 20 и 30% соответственно 54,5МПа, 56,5МПа и 59,0 МПа, что до 20% выше прочности контрольных образцов. Увеличение предела прочности при сжатии у образцов с 30% содержанием микрокремнезема по сравнению с прочностью образцов с 10%

содержанием МК составляло 7,5%. Данное увеличение прочности бетона при добавлении микрокремнезема в бетонную смесь можно объяснить обеспечением микроармирования цементного камня и тем, что высокодиспергированный микрокремнезем действует как химический компонент при образовании цементного камня. Микрокремнезем воздействует на процесс гидратации цемента, формирование контактной зоны между его зернами и цементным камнем, что в значительной степени определяется наличием  $\text{CaCO}_3$ . «Микрокремнезем по своим свойствам является уникальным материалом, так как он обладает высокой величиной поверхностной энергии, что обуславливает его химическую активность» [18].

## **2) Высокоактивный метакаолин:**

В последние годы в качестве минеральной добавки при изготовлении бетона стали использовать высокоактивный метакаолин ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) - продукт обезвоживания минерала каолинита (сокращенно МТК).

Размер частиц метакаолина на порядок мельче частиц портландцемента. Поэтому при введении в бетонную смесь метакаолин, взаимодействуя с гидроксидом кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, уплотняет и упрочняет структуру бетона. Добавка высокоактивного метакаолина позволяет уменьшить количество цемента при производстве бетона.

Микроструктура частиц высокоактивного метакаолина представлена на рисунке 1.8.

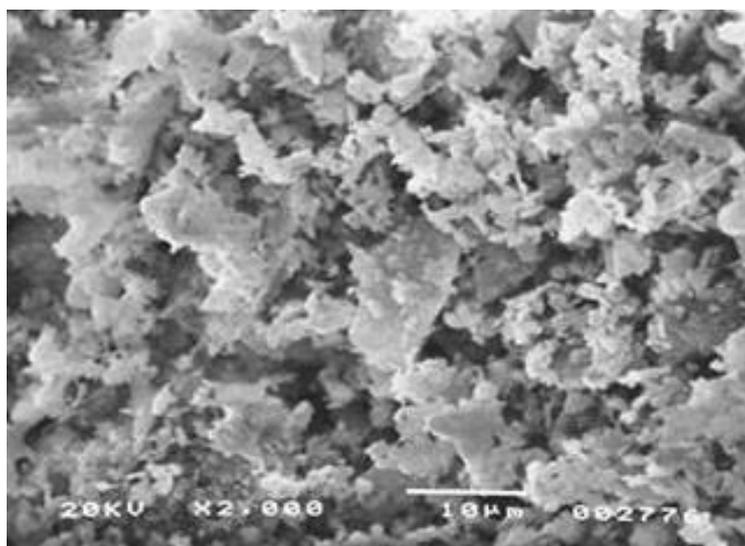


Рисунок 1.8 - Микроструктура частиц высокоактивного метакаолина  
(увеличено в 2 000 раз)

В процессе ранее проведенных экспериментальных исследований (К.В. Никитина «Совершенствование способов уменьшения водопоглощения цементно-содержащих материалов») высокоактивный метакаолин в мелкозернистую бетонную смесь добавлялся в количестве 5, 8, 10 и 15% от массы цемента. При этом в качестве вяжущего использовался бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б, природные Волжский и Камский пески в качестве мелкого заполнителя, гиперпластификатор Sika ViscoCrete 25RU.

«Оптимальная степень замены портландцемента высокоактивным метакаолином в составе мелкозернистого бетона, равна 8%; благодаря этому в бетоне обеспечивается максимальная прочность при сжатии» [20] (таблица 1.5).

Таблица 1.5 - Значения прочности бетона с добавлением метакаолина в состав бетонной смеси

Количество МТК, % от массы цемента	Предел прочности при сжатии, МПа		
	7 суток	28 суток	в водонасыщенном состоянии
0	36,1	46,2	42,0
5	39,3	57,1	52,5
8	43,4	58,2	54,1
10	38,2	52,4	47,1
15	42,5	56,4	45,2

«Таким образом, введение МТК в бетонную смесь должно производиться в строго определенных дозировках, не превышающих 8% от массы цемента» [20]. Превышение установленной дозировки МТК приводит к резкому снижению прочности бетонов.

В результате реакции между метакаолином и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  происходит формирование и оптимизация структуры порового пространства. Достижение высокой прочности связано с сокращением пористости за счет образования и роста первичных кристаллических гидросиликатных фаз, возможной перекристаллизации и образования вторичных кристаллов, заполнением ими пространства на микроуровне.

### **3) Зола уноса:**

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.

Зола уноса оказывает большое влияние на структурообразование бетона, так как в составе бетонной смеси она выполняет роль активной минеральной добавки, которая увеличивает общее количество вяжущего, а также служит микронаполнителем.

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.

Смеси, в составе которых присутствует зола-уноса, хорошо подходят для транспортировки на дальнейе расстояние за счет своей высокой жизнеспособности.

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.

Микроструктура частиц золы-уноса представлена на рисунке 1.9.

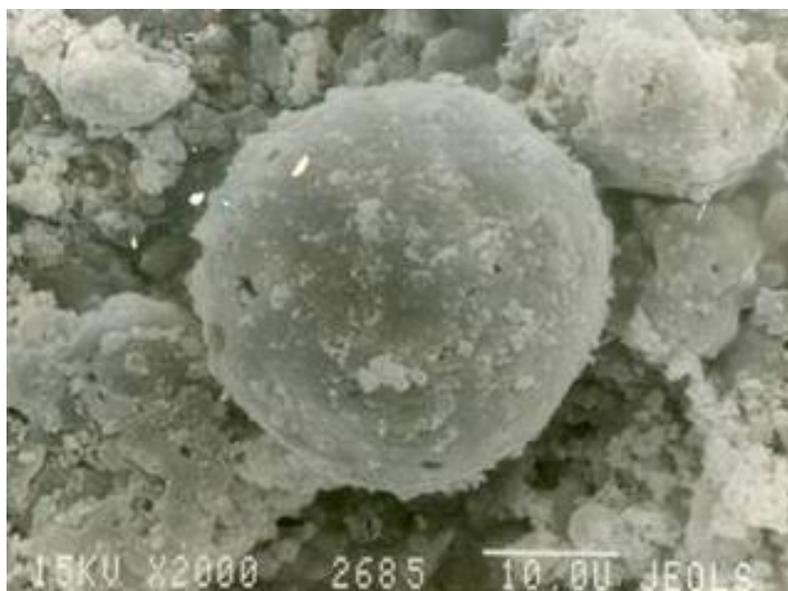


Рисунок 1.9 - Микроструктура частиц золы-уноса (увеличено в 2 000 раз)

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 контрактационной усадки до 30%.

### **1.3 Значение суперпластификаторов в составе самоуплотняющихся бетонных смесей**

Суперпластификаторы представляют собой полиэлектролиты органического происхождения, которые функционируют, как дисперсная химическая среда в гетерогенных системах. Их эффективность оценивается способностью сохранять технологические свойства бетонных смесей в течение минимум 30 минут (времени, которое необходимо для формирования изделий). Суперпластификаторы классифицируют на четыре основных вида:

- 1) СНФ - продукты конденсации сульфированного нафталина с формальдегидом;
- 2) СМФ - меламинсульфокислоты с формальдегидом;
- 3) МЛСТ - модифицированные лигносульфонаты технические;
- 4) П - полимеры, которые включают в себя полиакрилаты, полистирольные сульфонаты, поликарбоксилатные эфиры (гиперпластификаторы).

Основная функция суперпластификаторов в составе смеси - это разжижение бетонной смеси до высокоподвижной и литой консистенции. Суперпластификаторы вводятся в состав смеси в количестве 0,3-0,6% от общего объема (или 1% от массы вяжущего), для обеспечения необходимого количества влаги (снижает расход воды) и повышения физико-механических характеристик бетона.

Действие компонента можно по своей природе сравнить с действием молекулярного клеевого раствора. При добавлении компонента в состав бетонной смеси, цементные крупинки располагаются вокруг песчаных частиц. И вследствие этого процесса, возникновение пустот в цементе оказывается практически невозможным. Под действием суперпластификатора раствор пропитывается водой намного быстрее и кроме этого при вымешивании

бетонной смеси не появляются воздушные пузыри. После приготовления раствор проявляет свои свойства в течение примерно около трех часов. При добавлении компонента в состав бетонной смеси необходимо помнить о его точной дозировке. При этом силы межмолекулярного притяжения уменьшаются.

«Описанный выше процесс действия суперпластификатора, способствует замедлению процесса структурообразования» [27], 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.

Действие суперпластификатора имеет кратковременный характер. После 1,5 часов после их введения в состав смеси наблюдается резкое снижение подвижности. Поэтому смесь, в составе которой присутствует добавка суперпластификатор, рекомендуют укладывать в форму или конструкцию в промежуток времени, когда суперпластификатор еще обладает своими улучшающими свойствами.

«Применение добавок-пластификаторов позволяет увеличивать марку подвижности бетонной смеси с П1 до П5 без увеличения водосодержания системы. При этом конечные характеристики бетона не только не ухудшаются, но происходит их улучшение» [14]. То есть при получении равноподвижных смесей за счет снижения значения В/Ц, в конечном итоге бетон приобретает повышенную прочность, морозостойкость и водонепроницаемость.

Изготовление бетона с помощью добавления в состав смеси различных пластификаторов дает возможность уменьшить металлоемкость арматуры и понизить объем используемой воды. В итоге готовый материал обладает меньшим весом и себестоимостью. Уменьшение объема потребляемой воды при производстве дает возможность уменьшить вероятную усадку раствора при застывании.

Рассмотрим основные плюсы использования суперпластификаторов:

- одним из главных достоинств суперпластификаторов является экономичность, которая достигается, благодаря уменьшению нескольких пунктов производственных затрат;
- при добавлении суперпластификатора в состав раствора, расход цемента снижается примерно на 25% по сравнению с раствором без суперпластификатора;
- благодаря суперпластификаторам удается снизить объем применяемой воды;
- суперпластификаторы дают возможность использовать более легкий каркас армирования;
- так как время приготовления раствора существенно снижается, соответственно увеличивается и производительность;
- благодаря суперпластификаторам увеличиваются эксплуатационные характеристики готовых изделий;
- использование суперпластификаторов в составе бетонной смеси позволяет повысить прочность и долговечность бетона;
- бетоны, изготовленные с добавлением суперпластификатора, обладают более высоким показателем водонепроницаемости по сравнению с бетоном без пластификатора.

Выводы по первой главе:

1. Проведен анализ структуры и свойств самоуплотняющегося бетона. Самоуплотняющийся бетон обладает уникальными физико-механическими свойствами, которых нет у тяжелого бетона: высокая удобоукладываемость, отсутствие потребности в вибрировании и повышенные показатели по прочности.

2. Прочностные характеристики самоуплотняющегося бетона напрямую зависят от его гранулометрического состава, и химических

добавок, которые представляют собой пару из минерального наполнителя и суперпластификатора.

3. Самоуплотняющийся бетон является инновационным материалом, позволяющим ему конкурировать с тяжелыми бетонами. Но из-за отсутствия развитой базы нормативных документов и сложностью в организации работ, самоуплотняющийся бетон на территории России еще не получил широкого применения.

## 2 Методы испытаний и характеристика используемых материалов

### 2.1 Методы исследования

Исследования экспериментальной части проводились в лаборатории центра архитектурно-конструктивных решений и организации строительства ФГБУ ВО Тольяттинского Государственного Университета. В соответствии с требованиями действующих государственных стандартов в работе использованы различные методы исследования материалов и бетонов.

Качество и свойства мелкого заполнителя оценивались согласно методике изложенной в ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» и ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Зерновой состав определяют путем просева мелкого заполнителя через стандартный набор сит. Набор состоит из сита с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм, а также из проволочных сит со стандартными ячейками 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм и <0,16 мм. Перед проведением испытания на просев, пробу песка массой более 2000 г. высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы. Просеивание осуществляют механическим или ручным способом. При просеивании ручным способом, допускается определять окончание просеивания, интенсивно встряхивая каждое из сит над листом бумаги. Если при этом не наблюдается падение зерен песка, просеивание считают законченным.

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.

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

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<sup>3</sup> 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.

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

где:  $m_1$  - масса мерного сосуда с песком, кг;

$m$  - масса предварительно взвешенного мерного сосуда (без песка);

$V$  - вместимость сосуда, м<sup>3</sup>.

Оптимизация состав бетона определяется расчетно-экспериментальным методом, который включает в себя:

1 - проектирование состава бетона на основе исходных данных с помощью формул, графиков и таблиц;

2 - уточнение состава бетона на пробных замесах;

3 - исходя из расхода материалов на оптимальный пробный замес и объема этого замеса, определяют фактический расход составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Окончательно состав бетона выражается в виде расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона или в частях по массе или по объему по отношению к цементу.

В качестве объектов исследования использовались самоуплотняющиеся бетоны на композиционных вяжущих. Образцы бетона были изготовлены и испытаны партиями. Образцы испытывались на прочность при сжатии, морозостойкость и коррозионную стойкость.

Перед изготовлением образцов для испытаний, необходимо произвести оценку подвижности бетонной смеси в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний». Показателем, характеризующим подвижность самоуплотняющейся бетонной смеси служит диаметр расплыва бетонной смеси.

«Готовую бетонную смесь загружают в стандартный конус, установленный на металлический поддон. Перед испытанием конус и все приспособления очищают и протирают влажной тканью. Загрузку бетонной смесью производят в три слоя, штыкуя каждый слой 25 раз. Конус во время наполнения должен быть плотно прижат к поддону. После уплотнения бетонной смеси ее избыток срезают вровень с верхним краем конуса» [33]. Инструментальная погрешность испытания составляет не более 0,5 см.

Далее конус плавно снимают с бетонной смеси и определяют диаметр расплыва смеси ( $D$ ) по формуле 2.5. На рисунке 2.1 Изображена смесь после поднятия конуса.

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}, [\text{мм}] \quad (2.5)$$

где:  $D_1$  - максимальный диаметр расплыва, мм;

$D_2$  - диаметр расплыва в перпендикулярном направлении, мм.

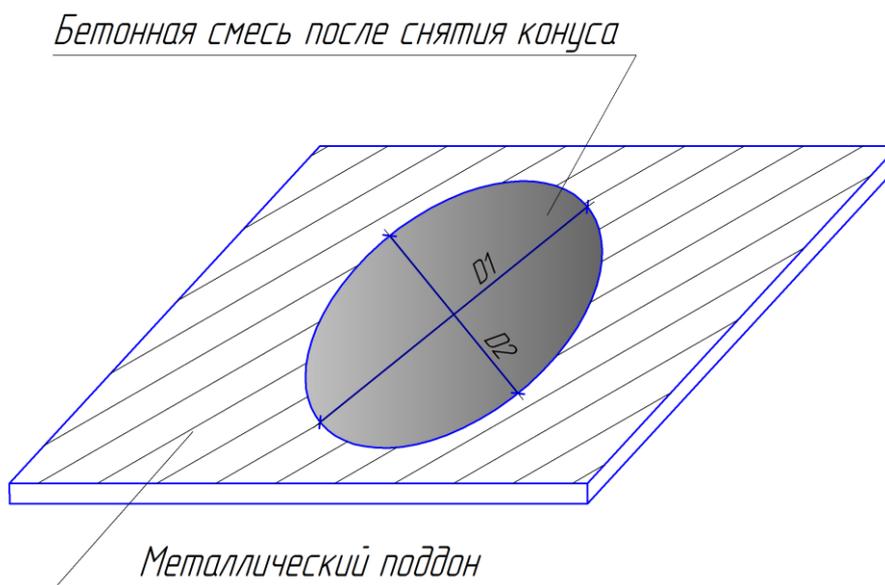


Рисунок 2.1 - Определение подвижности СУБ

После определения подвижности, приготовленную смесь укладывают в кубические, металлические формы с размером ребра 70 мм и покрывают влажной тканью для того, чтобы исключить испарение влаги их них. Температура помещения, в котором выдерживаются образцы, должна быть в пределах  $t=20\pm 5$  °С. По-прошествии 24-ех часов образцы извлекают из форм, после чего выдерживают их в камере для твердения в течение 28 суток при нормальных условиях ( $t=20\pm 5$  °С, относительная влажность воздуха -  $95\pm 5$  %). Образцы в камере нормального твердения не должны орошаться водой. Допускается хранение образцов под слоем влажного песка, опилок или других систематически увлажняемых гигроскопичных материалов.

Одним из главных методов испытаний является определения предела прочности самоуплотняющегося бетона на сжатие. Предел прочности при сжатии  $R_{сж}$  образцов СУБ определяли разрушающим методом, при помощи гидравлического пресса с нагрузкой 125 и 250 т. по формуле 2.6 согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», руководствуясь следующими требованиями. Нагрузка на образцы прикладывалась плавно без резких скачков.

$$R_{сж} = \frac{P_{разр}}{F}, \quad (2.6)$$

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  $см^2$ .

Гидравлический пресс, применяемый во время исследований, изображен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 - Гидравлический пресс для определения прочности на сжатие образцов СУБ

Одним из методов проведенных испытаний также является определение морозостойкости самоуплотняющихся бетонов.

Морозостойкость СУБ определяли в проектном возрасте в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Перед проведением испытания образцы СУБ насыщают 5%-ым раствором NaCl путем погружения их в жидкую среду на определенный срок - на 1/3 на 24 часа, на 2/3 на 24 часа, полностью – на 48 часов. Для определения морозостойкости применялся второй (ускоренный) метод, изложенный в ГОСТ 10060-2012. По данному методу образцы после насыщения 5%-ым раствором NaCl замораживают в морозильной камере в течение 4 часов (среда воздушная) при температуре 18°C, далее образцы вынимают из камеры и помещают в жидкую среду, которой является 5%-ый раствор NaCl. Раствор оттаивает в течение 4 часов при температуре 20°C. Процесс одного замораживания и одного оттаивания составляет один цикл.

Количество циклов, которое образец бетона выдержит без разрушения, определяло его показатель по морозостойкости.

Коррозионная стойкость СУБ определялась на образцах кубах с размерами грани 70 мм. Твердение образцов СУБ происходило в течение 28 суток при нормальных условиях и далее в воде в течение 14 суток. Далее образцы помещали в три агрессивные среды. Агрессивными средами служили 5%-ный раствор HCl, 5%-ный раствор MgCl<sub>2</sub> и 5%-ный раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, т.е. моделировалась кислотная, магниевая и сульфатная коррозия. В качестве критерия коррозионной стойкости бетонов принято изменение показателей предела прочности на сжатие бетона (формула 2.7):

$$K_c = \frac{R_{сж.}^{agr.}}{R_{сж.}^{контр.}} \leq 0,8 \quad (2.7)$$

где:  $R_{сж.}^{agr.}$  - предел прочности на сжатие образцов СУБ, хранившихся в агрессивной среде, МПа;

$R_{сж.}^{контр.}$  - предел прочности на сжатие образцов СУБ перед погружением в агрессивную среду, МПа.

## 2.2 Используемые материалы

### 2.2.1 Цемент

При выполнении экспериментальных исследований в качестве вяжущего материала использовался композиционный портландцемент ЦЕМ II/A-K(II-I) В42,5 торговой марки ООО «Холсим (РУС)».

Согласно ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» ЦЕМ II/A-K(II-I) В42,5 представляет собой композиционный портландцемент с характеристиками:

- 1) подтип А;
- 2) нормальнотвердеющий;
- 3) класс прочности В42,5;
- 4) средняя прочность  $\sim 557$  кгс/см<sup>2</sup>;
- 5) содержание портландцементного клинкера - 80-88%;

б) удельная поверхность по Блейну ~4000 см<sup>2</sup>/г;

7) присутствуют две минеральные добавки - пуццолана и известняк с суммарным содержанием 12-20%.

Химический состав данного цемента приведен в таблице 2.1, а минералогический состав клинкера в таблице 2.2.

Таблица 2.1 - Химический состав ЦЕМ II/A-K(П-И) (в %)

№ п/п	Показатель	Фактическое значение	Предел значения по ГОСТ 31108-2016
1	SiO <sub>2</sub>	18,8	-
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	-
3	CaO	61,1	-
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,7	-
5	MgO	1,6	Не более 5
6	TiO <sub>2</sub>	0,4	-
7	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	-
8	SO <sub>3</sub>	3,2	Не более 3,5
9	Na <sub>2</sub> O	0,1	-
10	K <sub>2</sub> O	0,7	-
11	Na <sub>2</sub> Oэкв.	0,6	-
12	П.П.П.	6,38	-
13	Cl	0,02	Не более 0,1

Таблица 2.2 - Минералогический состав клинкера (в %) для ЦЕМ II/A-K(П-И)

Показатель	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO <sub>св.</sub>
Фактическое значение	69,2	9,7	5,3	12,1	2,4

В область применения композиционного портландцемента ЦЕМ II/A-K(П-И) В42,5 входит: производство товарного бетона для рядовых конструкций, сборных ж/б элементов, мелкоштучных бетонных изделий, сухих строительных смесей.

### 2.2.2 Заполнители

При проведении испытаний использовалось два вида мелкого заполнителя - природные Волжский и Камский песок, а также один вид

крупного заполнителя - это щебень фракции 5-10 мм из гранодиоритов марки М1200, удовлетворяющий ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ». Выбор песков осуществлялся в соответствии с требованиями указанными в ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Гранулометрический состав мелкого заполнителя, для каждого из видов песка приведен соответственно в таблицах 2.3, 2.4.

Таблица 2.3 - Гранулометрический состав природного Волжского песка с насыпной плотностью 1470 кг/м<sup>3</sup>

№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
2,5	0,42	0,42
1,25	0,39	0,81
0,63	1,21	2,02
0,315	30,09	32,11
0,16	65,77	97,88
<0,16	2,12	100
$M_{кр}$	1,332	

Модуль крупности Волжского песка равен:

$$M_{кр} = \frac{0,42 + 0,81 + 2,02 + 32,11 + 97,88}{100} = 1,332$$

Таблица 2.4 - Гранулометрический состав Камского песка 0,5 мм

№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
2,5	33,93	33,93
1,25	20,85	54,78
0,63	18,35	73,13
0,315	18,49	91,62
0,16	7,51	99,13
<0,16	0,87	100
$M_{кр}$	3,526	

Модуль крупности Камского песка равен:

$$M_{кр} = \frac{33,93 + 54,78 + 73,13 + 91,62 + 99,13}{100} = 3,526$$

Выбранные пески отличаются между собой, как по виду, так и по химическому составу. По зерновому составу Камский песок крупнее Волжского. Использование Волжского песка в составе самоуплотняющейся бетонной смеси снижает водопотребность смеси и повышает ее воздухововлечение.

### 2.2.3 Минеральные наполнители

В качестве дополнительных минеральных добавок к композиционному цементу ЦЕМ II А-К(П-И) В42,5 были выбраны высокоактивные метаксаолин и микрокремнезем.

Первая минеральная добавка - метаксаолин является высокоактивной пуццолановой добавкой для модификации бетонов. Используется в паре с суперпластификаторами. Высокоактивный метаксаолин - продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата). Благодаря специальной технологии обжига и дальнейшего помола, продукт обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Применяется как в составах тяжелых, мелкозернистых и самоуплотняющихся бетонов, так и при проектировании составов и производстве сухих строительных смесей.

Основные свойства высокоактивного метаксаолина представлены в таблице 2.5, а его химический состав в таблице 2.6.

Таблица 2.5 - Свойства высокоактивного метаксаолина

№ п/п	Показатель	Значение
1	Цвет	Белый
2	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	12000 – 13000
3	Насыпная плотность (в рыхлом состоянии), кг/м <sup>3</sup>	450
4	Насыпная плотность (в уплотненном состоянии), кг/м <sup>3</sup>	550
5	Массовая доля оксида кремния SiO <sub>2</sub> , %	52,3
6	Массовая доля оксида алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	> 42
7	Массовая доля оксида железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	1,3
8	Пуццоланическая активность, мг Са(ОН) <sub>2</sub>	> 1000
9	Влажность, %	< 0,5
10	рН водной суспензии, ед.	6,5

Таблица 2.6 - Химический состав высокоактивного метакеолина

Компонент	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO
%	42,05	52,47	0,74	0,42	0,84	1,31	2,17

Применение МТК при приготовлении бетонных смесей ведет к модификации структуры цементного камня в затвердевшем бетоне, а именно, к ее уплотнению. Такой эффект связан с тем, что средний медианный размер зерен МТК на порядок меньше чем у вяжущего, что позволяет говорить об эффекте «микробетона», то есть заполнении межзеренных пустот (пустот между частицами вяжущего) частицами активной минеральной добавки, вступающими в химическое взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов, а также с примесными щелочными оксидами, что и ведет к образованию плотных не растворимых водой новообразований.

Вторая минеральная добавка - микрокремнезем уплотняет структуру бетона, взаимодействует с гидроксидом кальция, и «способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, что позволяет получить бетоны высокой прочности» [12].

Благодаря вводу микрокремнезема в состав бетонной смеси, удастся увеличить срок эксплуатации будущей конструкции. Как и МТК, микрокремнезем используют в паре с суперпластификатором. «Гранулометрический состав составляет 0,1 микрона, что в 100 раз меньше среднего размера зерна цемента» [5].

Частицы микрокремнезема обладают гладкой поверхностью и сферической формой. Основным компонентом отхода является диоксид кремния в аморфной форме.

Основные свойства микрокремнезема представлены в таблице 2.7, а химический состав приведен в таблице 2.8.

Таблица 2.7 - Основные свойства микрокремнезема

№ п/п	Показатель	Значение
1	Цвет	Серый
2	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	200000-300000
3	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,23
4	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	173
5	Массовая доля оксида кремния SiO <sub>2</sub> , %	91
6	Массовая доля оксида алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0,68
7	Массовая доля оксида железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0,69
8	Влажность, %	1,4

Таблица 2.8 - Химический состав микрокремнезема

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	S
%	90-92	0,68	0,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

«Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании МК и сравнительно низком содержании обычного портландцемента. Поскольку МК оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с содержанием МК всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе» [40].

Микрокремнезем способствует уменьшению расхода цемента до 200 – 450 кг/м<sup>3</sup>, обладает высокой прочностью на сжатие 65 - 80 МПа и выше 80 МПа для самоуплотняющихся бетонов, повышает антикоррозионную стойкость, а также снижает водонепроницаемость на 50%, что в совокупности факторов приводит к повышению долговечности таких бетонов.

## 2.2.4 Гиперпластификаторы

Для проведения экспериментальных исследований было выбрано два гиперпластификатора, на основе эфиров поликарбоксилата - STACHEMENT 2280 и 2481. Механизм действия поликарбоксилата представлен на рисунке 2.3.

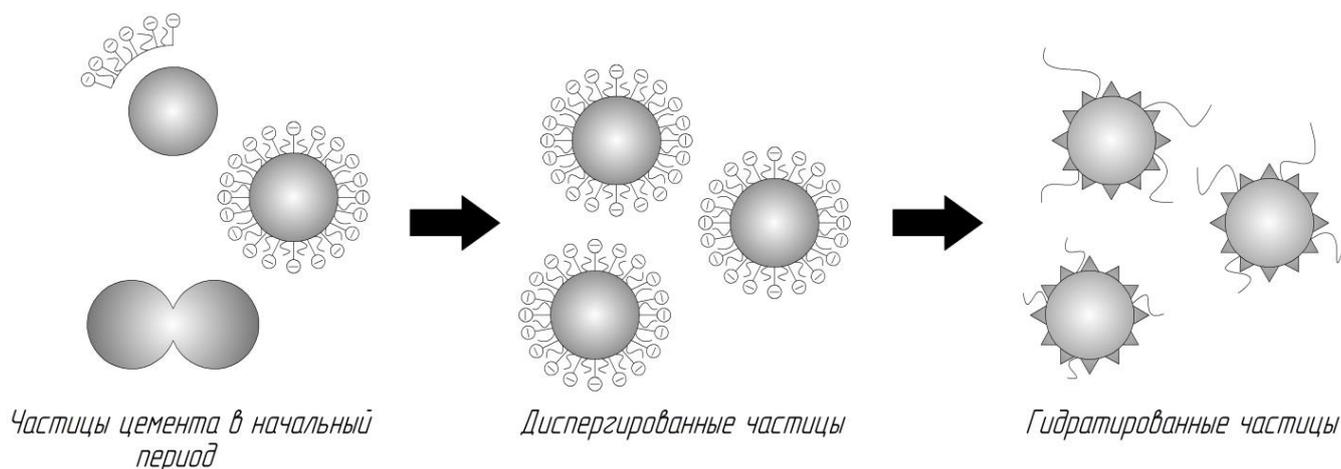


Рисунок 2.3 - Механизм действия поликарбоксилата

Характеристика Stachement 2280 - высокоэффективный жидкий, готовый к применению. Относится к разряду «быстрых» гиперпластификаторов, т.к. обладает ускоряющим эффектом и соответственно даёт высокие ранние прочностные характеристики бетона.

STACHEMENT 2280 предназначен для производства:

- преднапряженных бетонов;
- высокопрочных бетонов;
- водонепроницаемых бетонов;
- вибропрессованных изделий;
- бетонов, набирающих прочность при термической обработке.

По внешнему виду представляет собой красно-коричневую жидкость. Продукт не горюч и физиологически безвредный. Плотность при 20 °С составляет:  $1,065 \pm 0,030$  г/мл. Обычная доза составляет 0,7-0,9% раствора от массы цемента.

Данный гиперпластификатор: экономит цемент, снижает себестоимость бетона; повышает раннюю и финальную прочность, водонепроницаемость и долговечность бетона; повышает обрачиваемость опалубки; увеличивает стойкость бетона против климатического и химического воздействия; уменьшает количество воды затворения; препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон.

Характеристика Stachement 2481 - высокоэффективный жидкий, выпускается готовым к применению. Отличительная особенность - универсальность и высокая прочность.

Предназначается для производства:

- монолитных конструкций из бетона;
- пластичных бетонов при изготовлении сборных железобетонных конструкций;
- преднапряженных бетонов;
- водонепроницаемых бетонов;
- архитектурных бетонов.

При вводе в бетонную смесь: экономит расход цемента, снижает себестоимость бетона, повышает обрачиваемость опалубки, увеличивает коррозионную стойкость бетона, позволяет получать сверхпластичные бетонные смеси с длительным сохранением подвижности, препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон, 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. Проведена оценка влияния минеральных добавок и пластификаторов на свойства и прочность бетона.

### **3 Свойства самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих**

#### **3.1 Физико-механические свойства СУБ на композиционных вяжущих**

При приготовлении образцов самоуплотняющегося бетона применялись следующие материалы:

- цемент: композиционный портландцемент ЦЕМ II / А-К (П-И) В42,5, соответствующий характеристикам, изложенным в ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия»;

- два вида мелкого заполнителя: песок Волжский и песок Камский;

- крупный заполнитель в виде щебня из гранодиоритов фракции 5-10 мм, марки М1200;

- в качестве дополнительного третьего минерального наполнителя применялись: микрокремнезем и метакаолин;

- добавки гиперпластификаторы: STACHEMENT 2481, STACHEMENT 2280.

Модули крупности  $M_{кр}$  для выбранных песков были рассчитаны ранее и составляли:

- природный Волжский песок  $M_{кр} = 1,332$ ;

- природный Камский песок  $M_{кр} = 3,526$ .

Выбрав базовый состав компонентов самоуплотняющейся смеси, исследовали: 1 - влияние состава мелкого заполнителя на прочность при сжатии СУБ, 2 - влияние состава композиционного вяжущего на прочность при сжатии СУБ, 3 - эксплуатационные характеристики полученных образцов бетона.

Конечной точкой исследования является подбор оптимального состава бетонной смеси, для получения высокопрочный образцов самоуплотняющегося бетона.

Для достижения поставленных задач, был изготовлен ряд самоуплотняющихся бетонных смесей различных составов с различиями в

составе композиционного вяжущего, составе заполнителя, виде и наличии гиперпластификатора.

При изготовлении самоуплотняющихся бетонов важным фактором является оптимизация гранулометрического состава цемента. Для изготовления СУБ необходимо использовать тонкомолотые цементы, в которых обеспечивается нормированное содержание частиц размером менее 16 мкм, в частности частиц размерами менее 9 мкм. При недостатке данных частиц повышенный объем пустот между частицами вяжущего заполняется водой, в результате чего снижаются свойства смесей, в т.ч. устойчивость.

Составы бетонных смесей участвующих в исследовании приведены в таблице 3.1. В процессе экспериментов микрокремнезем вводился в бетонную смесь в количестве 10% от массы исходного композиционного цемента, высокоактивный метаксаолин в количестве 5% от массы исходного композиционного цемента. Количество данных добавок определено в результате прежних исследований.

Смесь укладывали в формы размером 70x70x70мм для определения прочности на сжатие  $R_{сж}$ , морозостойкости и коррозионной стойкости. Твердение образцов самоуплотняющегося бетона происходило при нормальных условиях в течение 28 суток. Результаты по прочности фиксировались после 7, 14 и 28 суток для определения предела прочности при сжатии. Результаты исследования полученных образцов самоуплотняющихся бетонов приведены в таблице 3.2.

Для удобства номера партий в таблицу 6 были записаны не последовательно по нумерации, а по различиям в составе. Сначала составы с дополнительной минеральной добавкой в виде микрокремнезема (6,2,4), далее составы с дополнительной минеральной добавкой в виде метаксаолина (7,3,5) и в конце составы со смешанным типом мелкого заполнителя (8,9,10,11). Образец партии 1 является контрольным, он изготовлен без введения добавок и гиперпластификаторов, на Камском песке.

Таблица 3.1 - Составы бетонных смесей

Состав	№ партии										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	единицы измерения - кг/м <sup>3</sup>										
Композиционный портландцемент ЦЕМ II А-К/(П-И)	423	432	425	434	427	413	412	408	408	410	410
Песок Камский	800	817	805	822	808	782	780	388	388	390	390
Песок Волжский	-	-	-	-	-	-	-	388	388	390	390
Щебень 5-10 мм из гранодиоритов	720	735	725	740	729	702	701	694	694	698	698
Микрокремнезем (МК)	-	43	-	43	-	41	-	41	-	-	-
Метакаолин (МТК)	-	-	21	-	21	-	21	-	21	-	-
Гиперпластификатор STACHEMENT 2280	-	4,3	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Гиперпластификатор STACHEMENT 2481	-	-	-	4,3	4,3	-	-	-	-	-	4,3
Вода	292	252	249	254	250	307	302	306	306	306	226
В/В	0,69	0,53	0,56	0,53	0,55	0,67	0,69	0,68	0,71	0,74	0,55
Распływ смеси, мм	65	70	70	71	72	68	68	65	65	72	71

Процесс испытания образца самоуплотняющегося бетона на прочность при сжатии, при помощи гидравлического пресса изображен на рисунке 3.1.

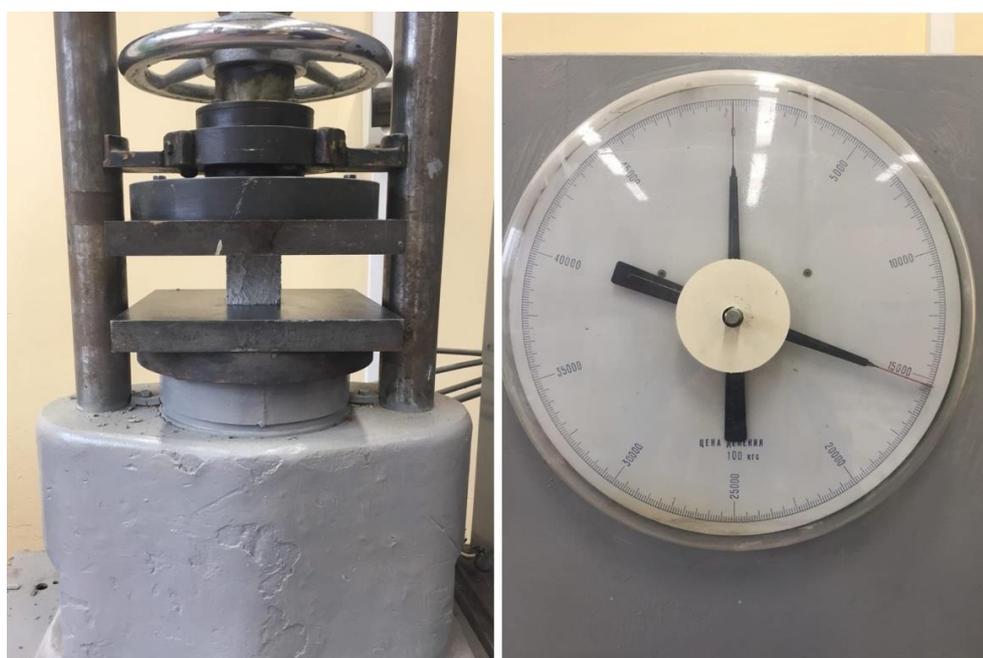


Рисунок 3.1 - Определение прочности при сжатии на гидравлическом прессе

Таблица 3.2 - Результаты исследования физико-механических свойств полученных СУБ

№ партии	Наименование добавок	В/В	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа, в возрасте, сут.			
				7	14	28	$\frac{R}{R_{\text{контр}}}$ , %
1	Контрольный состав КВ (без добавок) на Камском песке (КВ+ПК)	0,69	2244	20,8	26,0	28,6	100
6	КВ+МК+ПК	0,67	2244	22,0	23,3	24,6	86
2	КВ+МК+ПК STACHEMENT 2280	0,53	2274	28,5	31,5	32,9	115
4	КВ+МК+ПК STACHEMENT 2481	0,53	2274	24,2	30,2	36,6	128
7	КВ+МТК+ПК	0,69	2244	23,0	25,0	26,4	92
3	КВ+МТК+ПК STACHEMENT 2280	0,56	2259	29,1	31,7	33,0	115
5	КВ+МТК+ПК STACHEMENT 2481	0,55	2274	28,6	34,2	37,8	132
8	КВ+МК+ПВ/ПК(50/50)	0,68	2225	19,1	23,8	26,0	91
9	КВ+МТК+ПВ/ПК(50/50)	0,71	2225	24,1	26,5	28,4	99
10	КВ+ ПВ/ПК(50/50)	0,74	2262	22,1	27,5	30,1	105
11	КВ+ ПВ/ПК(50/50)+ STACHEMENT 2481	0,55	2262	26,3	34,0	40,1	140

где: КВ - композиционное вяжущее (ЦЕМ II / А-К (П-И) В42,5);

МК - микрокремнезем;

МТК - метакаолин;

ПК - Песок Камский, ПВ - Песок Волжский;

ПВ/ПК(50/50) - смешанный состав заполнителя в составе СУБ, с процентным соотношением Песка Волжского, к песку Камскому 50/50%;

В/В - отношение воды к композиционному вяжущему.

На рисунке 3.2 изображен образец самоуплотняющегося бетона в возрасте 28 суток перед испытанием на прочность при сжатии.



Рисунок 3.2 - Образец самоуплотняющегося бетона кубической формы с размерами ребра 70 мм

Для того чтобы определить какое влияние оказывает состав мелкого заполнителя на прочностные характеристики СУБ, был изготовлен ряд самоуплотняющихся бетонов с различными добавками к композиционному вяжущему и разным составом мелкого заполнителя. Сравнивались прочностные характеристики образцов изготовленных исключительно на Камском природном песке, и образцы у которых состав заполнителя представлял собой смесь Волжского и Камского песка в процентном соотношении 50:50. Результаты сравнения двух видов заполнителя приведены на рисунках 3.3, 3.4 и 3.5.

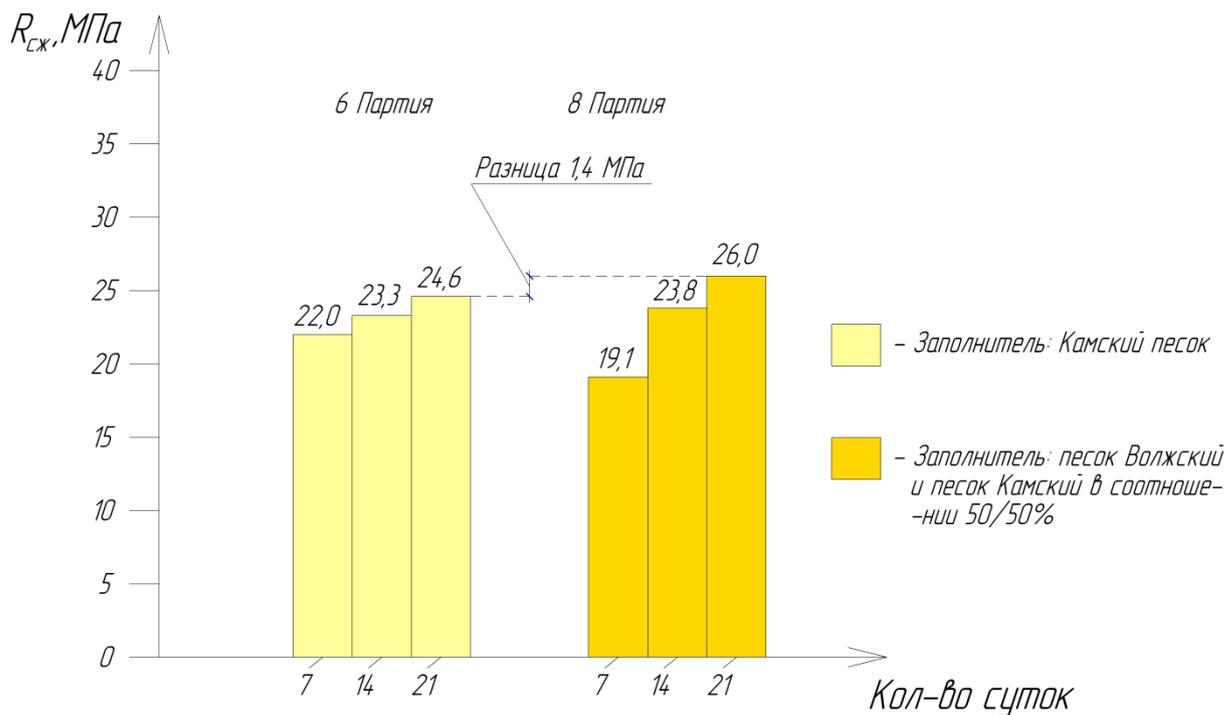


Рисунок 3.3 - Влияние вида мелкого заполнителя на прочность СУБ, на примере бетонов партий 6 и 8 (с добавкой МК)

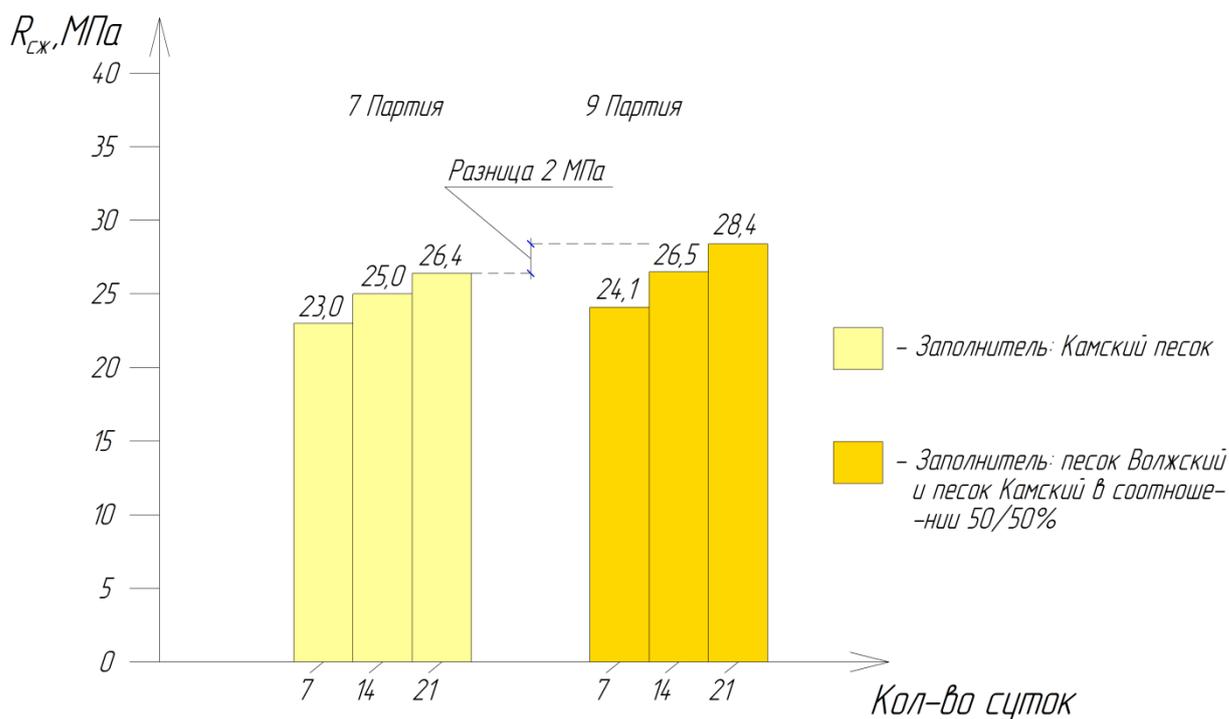


Рисунок 3.4 - Влияние вида мелкого заполнителя на прочность СУБ, на примере бетонов партий 7 и 9 (с добавкой МТК)

На рисунке 3.3 изображено сравнение составов бетона партий № 6 и 8.

Состав бетона партии №6: КВ + МК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №8: КВ + МК + (Песок Волжский/Песок Камский = 50/50%) + Ш (5-10 мм).

Составы бетонов партий №6 и №8 практически идентичны, в обоих составах присутствует третья минеральная добавка в виде микрокремнезема (МК), различие составляет лишь тип мелкого заполнителя. Как видно из рисунка 3.3 прочность при сжатии  $R_{сж}$  образцов бетона в возрасте 28 суток незначительно больше у партии №8 (со смешанным составом заполнителя) и разница составляет 1,4 МПа или 5,5%.

На рисунке 3.4 изображено сравнение составов бетона партий № 7 и 9.

Состав бетона партии №7: КВ + МТК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №9: КВ + МТК + (Песок Волжский/Песок Камский = 50/50%) + Ш (5-10 мм).

Составы бетонов партий №7 и №9 также практически идентичны, в данном случае третьей минеральной добавкой к композиционному вяжущему в обоих бетонах является метакаолин (МТК), различие составляет лишь тип мелкого заполнителя. Как видно из рисунка 3.4 прочность при сжатии  $R_{сж}$  образцов бетона в возрасте 28 суток незначительно больше у партии №9 (со смешанным составом заполнителя) и разница составляет 2,0 МПа или 7,5%.

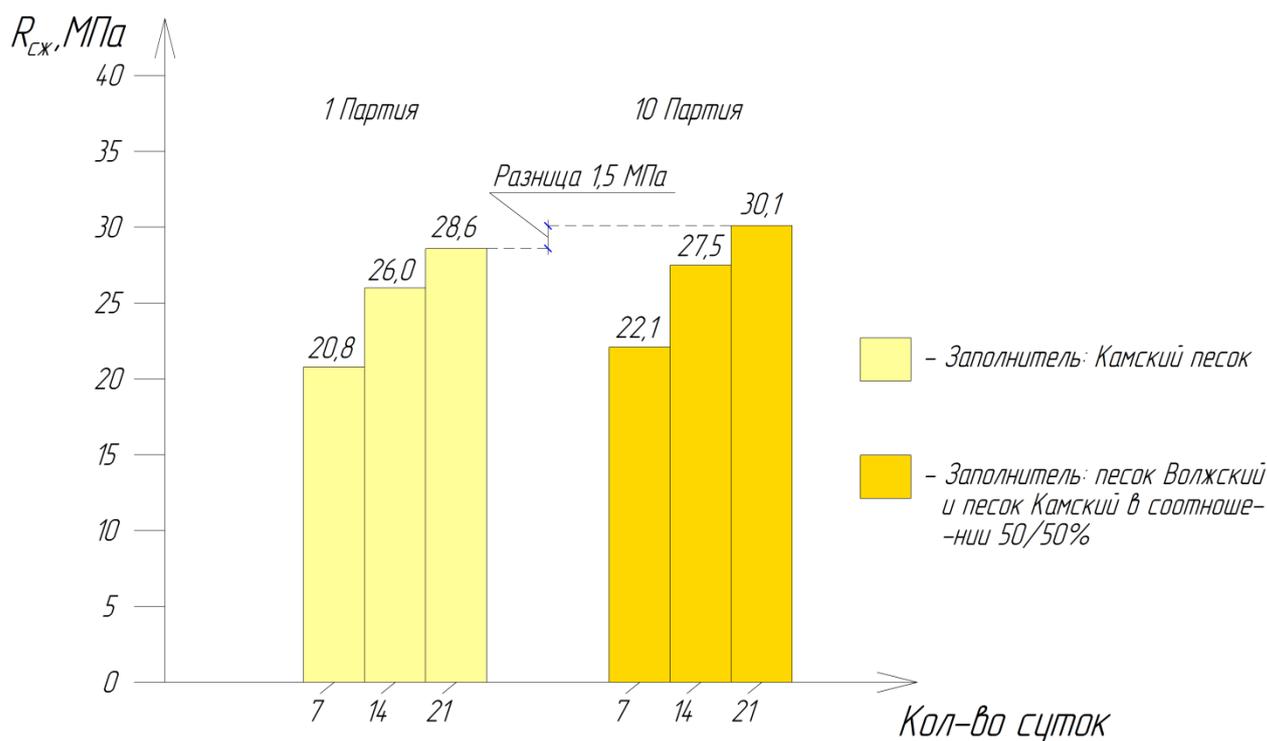


Рисунок 3.5 - Влияние вида мелкого заполнителя на прочность СУБ, на примере бетонов партий 1 и 10 (без дополнительных добавок)

Если на рисунках 3.3 и 3.4 сравнивались бетоны, в составе которых присутствовала третья минеральная добавка к композиционному вяжущему (партии 6-8, и 7-9), то на рисунке 3.5 приводится сравнение относительно контрольного состава бетона партии №1, то есть бетоны без дополнительных добавок (партии 1,10).

Состав бетона контрольной партии №1: КВ + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №10: КВ + (Песок Волжский/Песок Камский = 50/50%) + Щ (5-10 мм).

Как видно из результатов на рисунке 3.5 в данном случае также установлено, что более высокой прочностью на сжатие  $R_{сж}$  обладает бетон партии №10 со смешанным составом заполнителя и разница составляет 1,5 МПа или 5%.

Во всех рассмотренных случаях замена мелкого заполнителя в виде Камского песка на смешанный вид заполнителя (песок Камский/песок

Волжский = 50/50%), приводила к увеличению предела прочности при сжатии  $R_{сж}$ , независимо от того присутствовала ли в составе смеси дополнительная минеральная добавка или нет.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальным вариантом мелкого заполнителя является состав мелкого заполнителя, представляющий собой смесь песка природного Камского и Волжского, смешанных в пропорции 50 на 50 процентов. Такая замена позволяет увеличить прочность при сжатии  $R_{сж}$  от 5 до 7,5% относительно составов на Камском песке.

Это можно объяснить тем, что Камский песок обладает повышенным модулем крупности  $M_{кр} = 3,526$ , и при добавлении к нему песка Волжского с  $M_{кр} = 1,332$ , мы понижаем средний размер зерен в заполнителе, что позволяет смеси лучше уплотняться, и в связи с этим достигать более высоких показателей по прочности. Получается чем ниже содержание крупных частиц в составе мелкого заполнителя, тем благоприятней это сказывается на прочности СУБ.

Далее исследовалось влияние состава композиционного вяжущего на прочностные характеристики СУБ. Для этого были разработаны и испытаны 2 группы образцов: 1 группа с дополнительной добавкой к композиционному цементу в виде микрокремнезема (партии 2, 4, 6), а 2 группа с дополнительной добавкой в виде метаксаолина (партии 3, 5, 7).

На рисунках 3.6 и 3.7 изображены графики зависимости прочности при сжатии  $R_{сж}$  от возраста твердения образцов бетонов, для различных составов композиционного вяжущего. На рисунок 3.6 вынесены результаты определения прочности образцов бетона, которые содержали в себе дополнительную добавку микрокремнезема, а на рисунке 3.7 результаты прочности бетонных образцов, которые содержали в себе добавку метаксаолина.

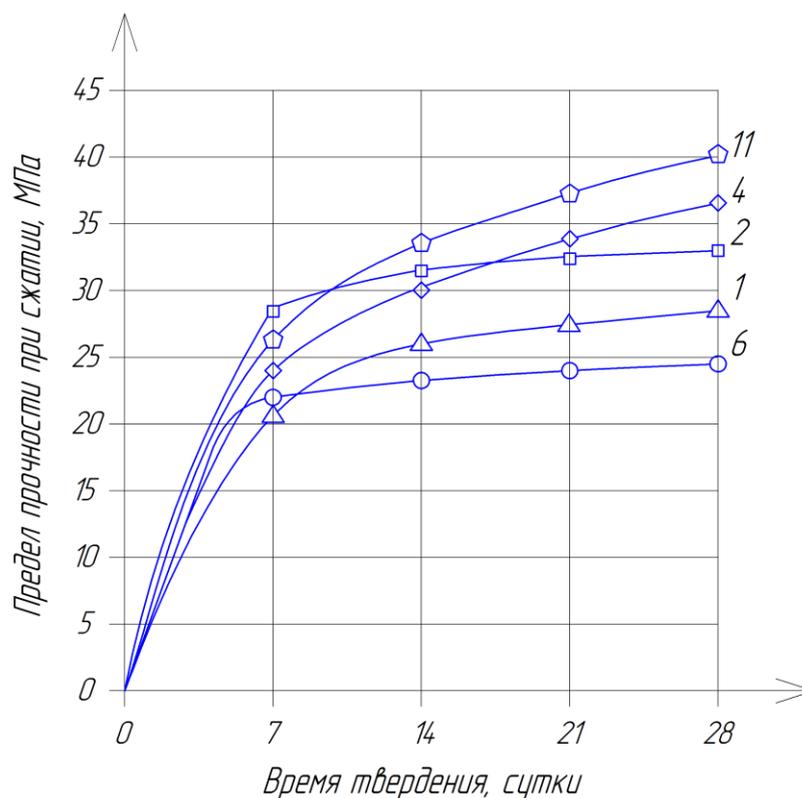


Рисунок 3.6 - Динамика набора прочности образцов бетона на композиционном вяжущем с добавкой микрокремнезема

Из рисунка 3.6 можно сделать несколько наблюдений:

1) Влияние минеральной добавки в виде МК на  $R_{сж}$ .

Рассмотрим результаты для бетонов партий №1 и №6.

Состав бетона контрольной партии №1: КВ + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №6: КВ + МК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Бетон партии №6 отличается от партии №1 лишь тем, что в его составе присутствует дополнительная добавка в виде микрокремнезема (МК). Как видно из рисунка 3.6 прочность при сжатии  $R_{сж}$  бетона партии №6, выше лишь на ранних сроках твердения (в возрасте 7 суток), далее же в возрасте 14, 21 и 28 суток прочность больше у контрольного состава бетона партии №1, без добавления третьей минеральной добавки. То есть при добавлении в состав контрольной партии №1 микрокремнезема, прочность при сжатии бетона уменьшается на 14%, что доказано на бетоне партии №6.

2) Влияние гиперпластификаторов на  $R_{сж}$ .

Рассмотрим результаты для бетонов партий №2 и №4 относительно контрольной партии бетона №1.

Состав бетона контрольной партии №1: КВ + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №2: КВ + МК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм) + Stachement 2280.

Состав бетона партии №4: КВ + МК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм) + Stachement 2481.

Рассматривая показатели по прочности при сжатии можно заметить, что  $R_{сж}$  для бетонов этих партий распределилось следующим образом №4>№2>№1.

То есть при добавлении любого из гиперпластификаторов в состав смеси, прочность при сжатии относительно контрольной партии бетона (без гиперпластификатора) была выше в любом из возрастов твердения. И наиболее эффективно проявляет себя гиперпластификатор Stachement 2481 (увеличение предела прочности при сжатии на 28% - партия СУБ №4).

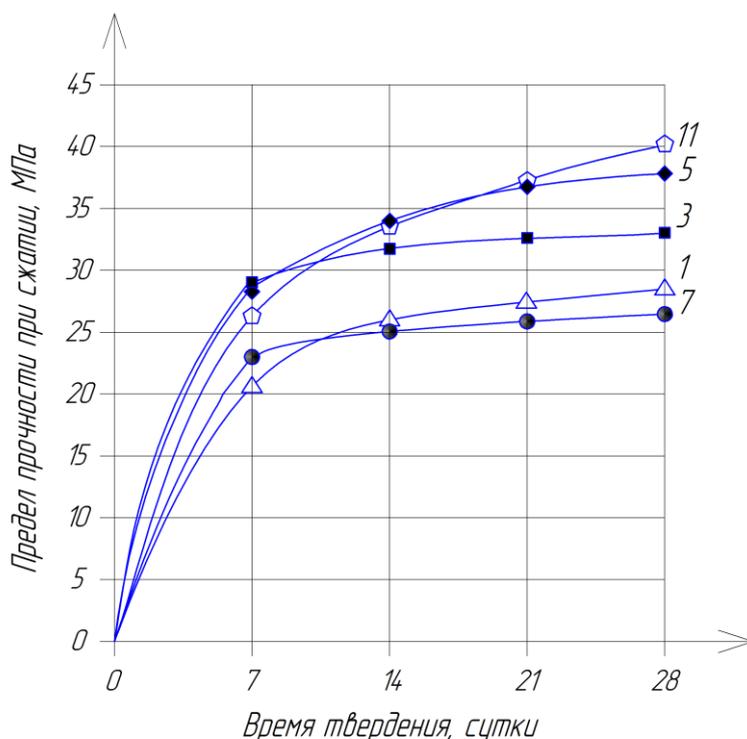


Рисунок 3.7 - Динамика набора прочности образцов бетона на композиционном вяжущем с добавкой метакаолина

Образцы бетона после разрушения представлены на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 - Образцы самоуплотняющегося бетона после испытания на предел прочности при сжатии

Из рисунка 3.7 можно сделать несколько наблюдений:

1) Влияние минеральной добавки в виде МТК на  $R_{сж}$ .

Рассмотрим результаты для бетонов партий №1 и №7.

Состав бетона контрольной партии №1: КВ + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №7: КВ + МТК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Отличие бетона партии №7 от партии №1 заключается в наличии метаксаолина (МТК) в его составе. Как видно из рисунка 3.7 прочность при сжатии  $R_{сж}$  бетона партии №7, выше лишь на ранних сроках твердения (в возрасте 7 суток), далее же в возрасте 14, 21 и 28 суток прочность больше у контрольного состава бетона партии №1, без третьей минеральной добавки. То есть при добавлении в состав контрольной партии №1 метаксаолина,

прочность при сжатии бетона уменьшается на 8%, что доказано на партии бетона №7.

## 2) Влияние гиперпластификаторов на $R_{сж}$ .

Рассмотрим результаты для бетонов партий №3 и №5 относительно контрольного партии бетона №1.

Состав бетона контрольной партии №1: КВ + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм).

Состав бетона партии №3: КВ + МТК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм) + Stachement 2280.

Состав бетона партии №5: КВ + МТК + Песок (Камский) + Щ (5-10 мм) + Stachement 2481.

Рассматривая показатели по прочности при сжатии можно заметить, что  $R_{сж}$  для бетонов этих партий распределилось следующим образом №5>№3>№1.

То есть при добавлении любого из гиперпластификаторов в состав бетонной смеси, прочность при сжатии относительно контрольной партии бетона (без гиперпластификатора) была выше в любом из возрастов твердения. И наиболее эффективно проявляет себя гиперпластификатор Stachement 2481 (увеличение предела прочности при сжатии на 32% - партия СУБ №5).

На основании полученных данных была изготовлена и испытана партия образцов СУБ №11, которая включала все положительные свойства определенные выше, а именно: отсутствие третьей минеральной добавки в составе смеси, оптимальный гранулометрический состав мелкого заполнителя, и наличие гиперпластификатора Stachement 2481. Результаты по бетону партии №11, уже присутствуют на рисунках 3.6, 3.7 и таблицах 3.2 и 3.1. Как видно из рисунков 3.6, 3.7 бетон партии №11 обладает наибольшим показателем по прочности при сжатии в возрасте 28 суток. Из чего можно сделать несколько выводов:

1) Наиболее оптимальный вариант мелкого заполнителя - это смешанный вариант, который представляет собой Волжский и Камский

пески, смешанные в соотношении 1:1. Такой вариант позволяет увеличить прочность при сжатии на 5-7,5% относительно случая, когда состав заполнителя представляет собой только Камский песок. Это связано с тем, что модуль крупности  $M_{кр}$  Камского песка составляет 3,526, что относит его к группе повышенной крупности. При использовании такого заполнителя в бетоне образуется повышенное количество пор, что отрицательно сказывается на его пределе прочности. Поэтому, исходя из опытных испытаний, можно сделать вывод, что для СУБ наиболее благоприятным является состав заполнителя, в котором преобладало бы повышенное содержание мелких частиц. И при разбавлении Камского песка Волжским ( $M_{кр} = 1,332$ ) это становится возможным.

2) Исходя из опытных испытаний, удалось установить, что добавление третьей минеральной добавки к уже готовому композиционному цементу не приводит к повышению предела прочности при сжатии такого бетона, а наоборот уменьшает его.

Композиционный цемент, используемый в опытных испытаниях, включает в себя две минеральных добавки - это пуццолана и известняк. Содержание этих добавок в цементе составляет от 12-20%. При твердении такого цемента пуццолана и известняк вначале взаимодействуют с водой образуя  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , двухкальциевый гидросиликат  $\text{C}_2\text{SH}_2$  и высокоосновные гидроалюминаты и гидроферриты кальция. Наличие активной минеральной добавки ускоряет гидратацию, и гидролиз цементной части пуццоланового цемента. При взаимодействии с водой и гидратом окиси кальция, образующегося при твердении цемента, отдельные зерна пуццоланы и известняка увеличиваются в объеме (набухают). Это вызывает уплотнение раствора или бетона, за счет заполнения свободного пространства между частицами вяжущего. Уплотнение увеличивает также водо- и солестойкость пуццоланового цемента, так как затрудняет проникновение агрессивных вод внутрь бетонного массива и препятствует разрушению бетона.

При добавлении к композиционному цементу третьей минеральной добавки, она по своей сути оказывается инертной, то есть не участвующей в реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . И присутствие такого материала, обладающего высокой удельной поверхностью (12000 и 200000  $\text{см}^2/\text{г}$  для МТК и МК соответственно), как показывают опыты лишь понижает предел прочности при сжатии, за счет того что они не участвуют в процессе гидратации цемента.

Согласно проведенным опытам оптимальное содержание минеральной добавки (пуццолана + известняка) в составе композиционного вяжущего составляет 12-20% по массе.

3) Присутствие в составе смеси гиперпластификатора, повышает предел прочности при сжатии бетона в 1,3 раза (на 28-32%). Так как при добавлении компонента в состав бетонной смеси, цементные крупницы располагаются вокруг песчаных частиц. И вследствие этого процесса, возникновение пустот в бетоне оказывается практически невозможным. Под действием гиперпластификатора раствор пропитывается водой намного быстрее и кроме этого при вымешивании бетонной смеси не появляются воздушные пузыри.

Окончательно оптимизированный состав СУБ на композиционном вяжущем приведен в таблице 3.3.

Таблица 3. 3 - Оптимизированный состав СУБ на композиционном вяжущем

Состав	Значение, $\text{кг}/\text{м}^3$
Вяжущее: композиционное вяжущее ЦЕМ II / А-К (П-И) В42,5 с содержанием пуццоланы и известняка от 12-20% в цементе.	410
Мелкий заполнитель: Камский и Волжский пески, смешанные в пропорции 1:1.	390 - песок Камский 390 - песок Волжский
Крупный заполнитель: щебень из гранодиоритов фракции 5-10 мм, марки М1200	698
Гиперпластификатор: Stachement 2481.	4,3
Вода	226
Расплыв бетонной смеси принят 71 мм.	

### 3.2 Эксплуатационные свойства самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих

#### 3.2.1 Морозостойкость бетонов

Морозостойкость самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих определяли для партий бетонов, показавших максимальные показатели по пределу прочности на сжатие, - партии №5 и №11. Составы партий №5 и №11, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Составы партий для исследований эксплуатационных свойств бетонов

Состав	№ партии	
	5	11
	единицы измерения - кг/м <sup>3</sup>	
Композиционный портландцемент ЦЕМ II А-К/(П-И)	427	410
Песок Камский	808	390
Песок Волжский	-	390
Щебень 5-10 мм из гранодиоритов, М1200	729	698
Метакаолин (МТК)	21	-
Гиперпластификатор STACHEMENT 2481	4,3	4,3
Вода	250	226
В/В	0,55	0,55
Распływ смеси, мм	72	71

Исследования проводили согласно методике изложенной в пункте 2.1 магистерской диссертации. Определяли изменение массы бетонов и изменение показателя предела прочности при сжатии, после определенного количество циклов замораживания и оттаивания. Результаты приведены в таблицах 3.5, 3.6 и 3.7.

Таблица 3.5 - Значения прироста и снижения предела прочности при сжатии в процессе повторяющегося цикла замораживания и оттаивания

№ состава	Увеличение «+» или снижение предела прочности при сжатии при поочередном замораживании и оттаивании, %, для количества циклов:			
	100	150	200	250
5	+2,2	+0,8	-2,2	-5,2
11	+2,0	+0,6	-2,0	-3,8

Таблица 3.6 - Визуальные признаки разрушения в процессе повторяющегося цикла замораживания и оттаивания

№ состава	Визуальные признаки разрушения, для количества циклов:			
	100	150	200	250
5	Отсутствие признаков		Шелушение поверхностного слоя, откол углов образца	
11	Отсутствие признаков			Шелушение поверхностного слоя, откол углов образца

Таблица 3.7 - Снижение массы бетона в процессе повторяющегося цикла замораживания и оттаивания

№ состава	Снижение массы, %			
	100	150	200	250
5	0	0	0	0,35
11	0	0	0	0,22

Исходя из полученных результатов, образец бетона партии №11 оказался более стойким к процессу попеременного замораживания и оттаивания, чем бетон партии №5. При испытании бетона из партии №11 по второму ускоренному методу согласно «ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости», образец бетона выдерживает 250 цикла попеременного замораживания в воздухе и оттаивания в растворе 5% NaCl, что соответствует марки по морозостойкости F<sub>1800</sub>, что является достаточно высоким показателем. Потери по массе образца партии №11 составили 0,22% во время 250-го цикла.

### 3.2.2 Коррозионная стойкость бетонов

Коррозионную стойкость самоуплотняющихся бетонов на композиционных вяжущих определяли на образцах бетона партий №11 и №5, составы которых приведены в таблице 3.4. Коррозионную стойкость определяли на образцах кубах с размером грани 70 мм, которые сначала твердели в течение 28 суток при нормальных условиях, а далее твердели в течение 14 суток в воде.

Образцы испытывались в трех различных агрессивных средах: 1) хлорид магния -  $MgCl_2$ , 2) сульфат натрия -  $Na_2SO_4$  и 3) раствор серной кислоты -  $HCl$ . Результаты изменения коэффициента  $K_c$  от длительности выдержки представлены на рисунках 3.9 и 3.10

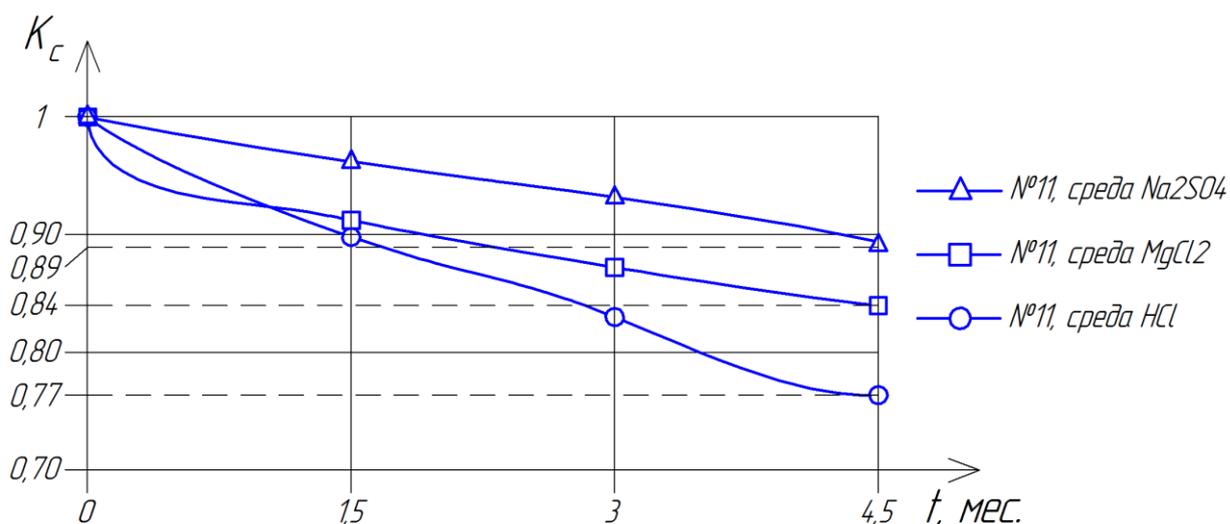


Рисунок 3.9 - Зависимость коэффициента коррозионной стойкости  $K_c$  СУБ партии №5, от длительности выдержки в агрессивной среде

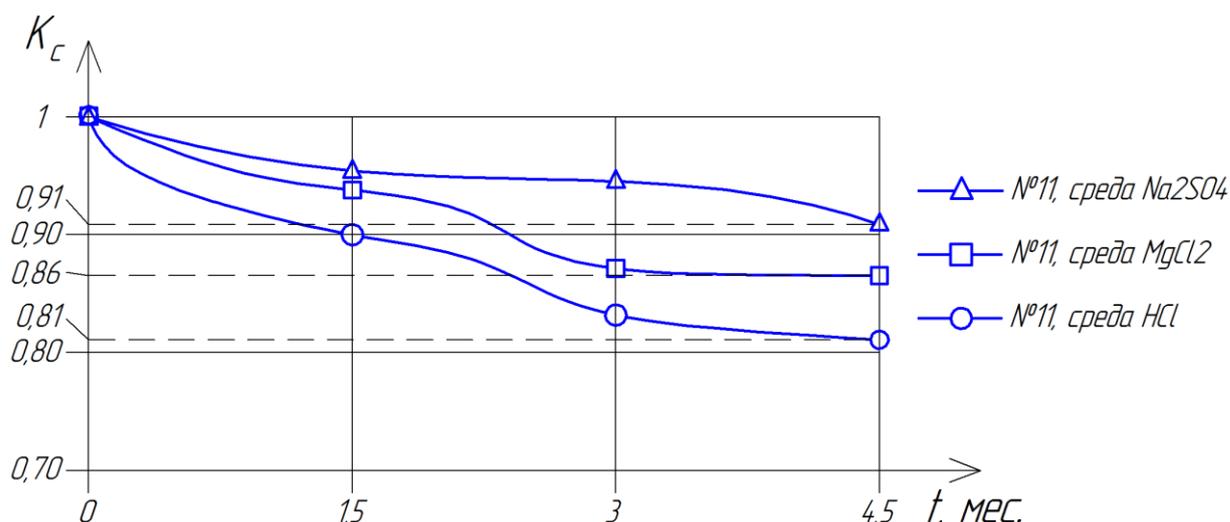


Рисунок 3.10 - Зависимость коэффициента коррозионной стойкости  $K_c$  СУБ партии №11, от длительности выдержки в агрессивной среде

По прошествии 4,5 месяцев, значения коэффициента  $K_c$  для бетонов партий №5 и №11 были следующие:

- для среды  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $K_c = 0,89$  (Состав №5),  $K_c = 0,91$  (Состав №11);
- для среды  $\text{MgCl}_2$ :  $K_c = 0,84$  (Состав №5),  $K_c = 0,86$  (Состав №11);
- для среды  $\text{HCl}$   $K_c = 0,77$  (Состав №5),  $K_c = 0,81$  (Состав №11).

Из полученных результатов видно, что коэффициент  $K_c$  бетона партии №5 в среде  $\text{HCl} = 0,7 < 0,8$ , что свидетельствует о том бетон не прошел испытание на коррозионную стойкость. Бетон партии №11 показал более высокие показатели, и в целом удовлетворяет характеристикам по сопротивлению агрессивным средам.

Выводы по третьей главе:

1. Проведены исследования влияния состава мелкого заполнителя на физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона.
2. Проведены исследования влияние состава композиционного вяжущего на физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона.
3. На основании результатов исследований определен оптимальный состав самоуплотняющегося бетона на композиционном вяжущем. Исследованы эксплуатационные характеристики образца изготовленного по этому составу.

## Заключение

На основании результатов экспериментальных исследований приведенных в данной работе следует ряд выводов:

1. Анализ физико-технических свойств выявил отличия физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона от обычных тяжелых бетонов. Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона зависят от его состава, соотношения материалов, вида и количества минеральных заполнителей, а также суперпластификаторов.

2. Проведена оценка влияния состава мелкого заполнителя на физико-механические свойства СУБ. Установлено, что наиболее оптимальным вариантом мелкого заполнителя является состав, представляющий собой смесь песка природного Камского и Волжского, смешанных в пропорции 50 на 50 процентов. Данный вариант позволяет увеличить предел прочности при сжатии СУБ от 5 до 7,5% относительно варианта бетона, когда в качестве мелкого заполнителя используется исключительно Камский песок. Связан данный эффект с тем, что разбавляя Камский песок Волжским мы увеличиваем содержание более мелких частиц по модулю крупности, что благоприятно сказывается на прочностных характеристиках СУБ.

3. Проведена оценка влияния состава композиционного вяжущего на физико-механические свойства СУБ. Установлено что, при добавлении к уже готовому композиционному вяжущему третьей минеральной добавки, прочность при сжатии такого бетона уменьшается в пределах от 8 до 14%. Такая добавка оказывается инертной в составе СУБ, и не участвует в реакции с  $Ca(OH)_2$  и процессе гидратации цемента. На основании вышесказанного, был сделан вывод, что оптимальное содержание минеральных добавок в составе композиционного вяжущего составляет 12-20% от массы цемента; в нашем случае это были пуццолана и известняк. Пуццолана и известняк обладают более высокой удельной поверхностью по сравнению с портландцементом, в который они добавлялись и при взаимодействии с

водой образуют  $Ca(OH)_2$ . Далее отдельные зерна пуццоланы и известняка увеличиваются в объеме (набухают) и тем самым заполняют объем пустот в самоуплотняющемся бетоне, что приводит к упрочнению его структуры.

4. Присутствие в составе композиционного вяжущего гиперпластификатора, повышает предел прочности при сжатии СУБ на 30%. Так как при добавлении компонента в состав бетонной смеси, цементные крупинцы располагаются вокруг песчаных частиц. И вследствие этого процесса, возникновение пустот в цементе оказывается практически невозможным. Под действием гиперпластификатора раствор пропитывается водой намного быстрее и кроме этого при вымешивании бетонной смеси не появляются воздушные пузыри.

5. В результате исследований предложен оптимальный состав бетонной смеси для приготовления самоуплотняющегося бетона, с легкодоступными материалами для нашего региона. Полученная бетонная смесь обладает достаточной подвижностью и удобоукладываемостью за счет действия гиперпластификаторов, а самоуплотняющиеся бетоны, изготовленные на ее основе, обладают плотной структурой, минимальным количеством пустот, и хорошими эксплуатационными характеристиками. Полученный нами состав бетона может быть использован в дальнейшем промышленными организациями.

## Список используемых источников

1. Баженов Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. –Т. 3(711). – С. 6-14.
2. Батудаева А.В. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А.В. Батудаева, Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 2005. – № 4. – С. 14-18.
3. Боженков П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология / П.И. Боженков. - М.: АСВ, 1994. 264 с.
4. Болотских О.Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика. Часть 1. Самоуплотняющийся бетон: история, состав, свойства, преимущества и перспективы / О.Н. Болотских // Бетон и железобетон в Украине. – 2006. – №6. – С. 2-6.
5. Брыков А.С. Гидратация портландцемента: учеб.пособие. С-Петербург. / А.С. Брыков. - М.: СПбГТИ(ТУ). - 2008. - С. 30-32 .
6. Горчаков Г.И., Баженов, М.Ю. Строительные материалы : учеб.пособие. / Г.И. Горчаков, М.Ю. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. 686 с.
7. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 32 с.
8. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартиформ, 2019. – 28 с.
9. ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения. - Введ. 2007-06-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 4 с.
10. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 10 с.

11. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Введ. 2016-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 10 с.
12. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. Введ. 1987-01-01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с.
13. ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия. Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 41 с.
14. ГОСТ Р 52804-2007. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. - Введ. 2009-01-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 32 с.
15. ГОСТ Р 56178-2014. Модифкаторы органо -минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. - Введ. 2015-04-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 24 с.
16. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 16 с.
17. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. Введ. 1989-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 25 с.
18. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия (с поправкой). Введ. 2015-04-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 7 с.
19. Гусенков А. С. Модифицированные бетоны на основе отсевов дробления известняка : диссертация к.т.н. / А.С. Гусенков. - М.: РГБ ОД,2009. 158с.
20. Комохов, П.Г. Научное исследование технологии конструкционного бетона как композиционного материала (часть 1) / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – № 4. – С. 36-37.
21. Коренькова, С.Ф, Анпилов, С.М., Лукоянчева, С.М., Веревкин, О.А. Современные строительные материалы. Самара / С.Ф. Коренькова, С.М. Анпилов, С.М. Лукоянчева, О.А. Веревкин. - М.: Стройиздат, 2001. 129 с.
22. Лотов В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий / В.А. Лотов // Строительные материалы – Наука. – 2006. – № 8. – С. 5-7.

23. Применение добавок на основе эфиров поликарбоксилатов производства концерна BASF при изготовлении вибрационных и самоуплотняющихся бетонов / СТО 70386662-306-2012. Издание 1. – М.: 000 "БАСФ Строительные системы", ОАО ЦНИИС, 2012. – 56 с.

24. Путилова М.Н. Исследование и оптимизация состава мелкозернистого бетона / М.Н. Путилова, В.Н. Шишканова // Магистерская диссертация. – 2019 г. – 78с.

25. Рыбьев, И.А. Строительные материаловедение: Учеб. пособие для строит, спец. вузов. / И.А. Рыбьев. - М.: Высш.шк., 2003. 701 с.

26. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. – К.: Будивэльнык, 1991. – 144 с.

27. Толыпина, Н.М., Рахимбаев, Ш.М., Карпачева, Е.Н. Об эффективности действия суперпластификаторов в мелкозернистых бетонах в зависимости от вида мелкого заполнителя / Н.М. Толыпина, Ш.М. Рахимбаев, Е.Н. Карпачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 66-74.

28. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8-12.

29. Ушеров-Маршак А.В. Современный бетон и его технологии / А.В. Ушеров-Маршак / А.В. Ушеров-Маршак // Бетон и железобетон. – 2009. – Вып. 2. – С. 20-25.

30. Хозин, В.Г., Морозов, Н.М., Мугинов, Х.Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов / В.Г. Хозин, Н.М. Морозов, Х.Г. Мугинов // Строительные материалы. 2010. №9. С. 72-73.

31. 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.

32. Шейнфельд А.В. Научные основы модифицирования бетонов комплексными органоминеральными добавками на основе техногенных пуццоланов и поверхностно-активных веществ // Дисс. докт. техн. наук: 05.23.05 А.В. Шейнфельд. – М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2015. – 40 с.

33. Шишканова В.Н., Власов С.А. Композиционные вяжущие для самоуплотняющихся бетонов / В.Н. Шишканова, С.А. Власов // Научно-методический журнал «Наука и образование: новое время», №4, 2019г.

34. Шишканова В.Н., Власов С.А. Повышение прочности самоуплотняющегося бетона на композиционных вяжущих введением минеральных наполнителей / В.Н. Шишканова, С.А. Власов // Межотраслевой научно-информационный центр, Конференция МК-14 20, 2020г.

35. Шишканова, В.Н., Путилова, М.Н. Влияние вида заполнителя на прочность мелкозернистого бетона / В.Н. Шишканова, М.Н. Путилова // Научно-методический журнал «Наука и образование: новое время», №2, 2019г.

36. Ahmed S.A.R. Review article on Self-Compacting Concrete / A.R.A. Sabry // Civil Engineering Department, Faculty of Engineering Altahadi University. – 2003. – 52 pp.

37. Ahuja H.N. Techniques in Planning and Controlling Construction Project / H.N. Ahuja // New York: John Wiley & Sons. – 2017. – 145 pp.

38. 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.

39. Koval S.B. Analysis of various media concrete penetrating ability depending on different factors affecting water absorption [text] / S.B. Koval, M.N. Kagan // International conference on industrial engineering. – 2017. – P. 132-138.

40. Nishibayashi S. A study on the flow of highly superplasticized concrete / S. Nishibayashi, S. Inoue, A. Yoshino // the Fourth CANMET/ACI Intern. Conf. – SP-148-10, –1994. –: Proc. – Detroit, 1994. – P. 177-185.
41. Okamura H. Mix design for self-compacting concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of JSCE. – 1995. – No. 25. – P. 107-120.
42. Okamura H. Self-compacting high performance concrete / H. Okamura, M. Ouchi // Concrete International. – 1997. – Vol. 19, No 7. – P. 50-54.
43. Shoya M. Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates / M. Shoya, S. Sugita, Y. Tsukinaga, M. Aba, K. Tokuhasi // Proceedings of the intern. Conf. «Creating with Concrete». – Dundee, 1999. – P. 121-130.
44. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use // SCC European Project Group. – May 2005. – 63 pp.
45. Viacava I.R. Self-compacting concrete of medium characteristic strength / I.R. Viacava, A.A. de Cea, G.R. de Sensale // Construction and Building Materials. – Vol. 30. – 2012. – P. 776-782.