

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Самоуплотняющийся бетон с комплексными добавками

Обучающийся

Д.А. Сяйлев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

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

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

Консультант

канд. филолог. наук, доцент, Т.Г. Никитина

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

Тольятти 2022

Содержание

Введение	3
1 Самоуплотняющиеся бетоны с комплексной добавкой. Состояние вопроса	6
1.1 От традиционных бетонов к самоуплотняющимся	6
1.2 Применение самоуплотняющихся бетонов в России и СНГ	11
1.3 Особенности рецептуры самоуплотняющихся бетонов.....	19
1.3.1 Минеральные добавки (микронаполнители) в самоуплотняющемся бетоне.....	20
1.3.2 Пластификаторы в самоуплотняющемся бетоне	31
2 Методы испытаний и характеристика используемых материалов.....	36
2.1 Методы испытаний.....	36
2.2 Используемые материалы	41
2.2.1 Цемент.....	41
2.2.2 Мелкий заполнитель.....	42
2.2.3 Крупный заполнитель	43
2.2.4 Комплексная добавка	45
3 Самоуплотняющийся бетон с комплексной добавкой	51
3.1 Применение самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой.....	51
3.2 Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона с комплексными добавками	54
3.2.1 Влияние комплексной добавки на прочность самоуплотняющегося бетона.....	59
3.2.2 Влияние комплексной добавки на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона.....	69
3.3 Разработка оптимального состава и экономическое обоснование использования самоуплотняющегося бетона в монолитных конструкциях...	71
Заключение	75
Список используемой литературы и используемых источников	77

Введение

Актуальность исследования. В настоящее время в России вслед за Европейскими странами развивается практика применения в промышленном и гражданском строительстве, а также при производстве сборных конструкций самоуплотняющихся бетонов.

При этом, создание такой бетонной смеси, требует повышенного расхода цемента, что ведет к значительному удорожанию товарного бетона и готовых конструкций, поэтому, несмотря на высокую технологичность данного материала, комплексную экономическую эффективность, применение таких бетонов весьма ограничено на территории нашей страны.

Повышение эффективности самоуплотняющихся бетонов, а также расширение сферы их применения может быть достигнуто за счет применения комплексных добавок с оптимально подобранным составом, способных уменьшить расход цемента и добавить бетонной смеси новые свойства.

Объект исследования магистерской диссертации – самоуплотняющийся бетон с комплексной добавкой.

Предметом исследования магистерской диссертации являются составы и свойства самоуплотняющихся бетонов с комплексными добавками.

Цель исследования – определить влияние различных комплексных добавок на свойства самоуплотняющегося бетона, произведенного на легкодоступных заполнителях.

Гипотеза исследования состоит в том, что, если подробно изучить зарубежный и отечественный опыт использования самоуплотняющегося бетона и добавок для бетона, провести дополнительные экспериментальные исследования, можно получить самоуплотняющийся бетон с комплексной добавкой на легкодоступных сырьевых материалах и в дальнейшем

использовать его при строительстве монолитных конструкций на территории Самарской области.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- Анализ проблем и методов повышения эффективности и расширения сферы применения самоуплотняющихся бетонов;
- Определить методы экспериментальных исследований и характеристики применяемых материалов;
- Исследовать физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов с применением комплексных добавок;
- Подобрать оптимальный состав комплексной добавки для применения ее в самоуплотняющихся бетонах на территории Самарской области.

Методы исследования: анализ отечественной и зарубежной литературы и источников.

Исследования качества мелкого и крупного заполнителей согласно ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия, ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний, ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

Подбор состава самоуплотняющегося бетона и исследование его свойств производились согласно ГОСТ Р 59714-2021 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия и ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний.

Научная новизна исследования заключается в:

- Представлен сравнительный анализ влияния различных сочетаний минеральной добавки и пластификатора на свойства самоуплотняющегося бетона, используемого при бетонировании монолитных конструкций, в частности фундаментных плит.

– Подобран оптимальный состав комплексной добавки, позволяющий сократить количество цемента в бетонной смеси и повысить физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона.

Практическая значимость исследования состоит в разработке и применении на территории Самарской области самоуплотняющихся бетонов с комплексными добавками на основе минеральных наполнителей и пластификаторов.

Апробация результатов работы велась в течение всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях:

– Шишканова В.Н., Сяйлев Д.А. Зола-уноса как минеральная добавка при изготовлении самоуплотняющегося бетона / В.Н. Шишканова, Д.А. Сяйлев // VII Международная научно-практическая конференция «Новые научные исследования» – 2022.

– Шишканова В.Н., Грицкив Л.Н., Сяйлев Д.А. Комплексные добавки при изготовлении самоуплотняющегося бетона / В.Н. Шишканова, Л.Н. Грицкив, Д.А. Сяйлев // V Международная научно-практическая конференция «Научные исследования студентов и учащихся» – 2022.

На защиту выносятся:

– Современное состояние вопроса применения самоуплотняющихся бетонов;

– Исследование свойств самоуплотняющегося бетона с комплексными добавками;

– Разработка оптимального состава самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, 3 глав (разделов), заключения, содержит 46 рисунков, 20 таблиц, список используемой литературы (42 источника). Основной текст работы изложен на 81 странице.

1 Самоуплотняющиеся бетоны с комплексной добавкой. Состояние вопроса

1.1 От традиционных бетонов к самоуплотняющимся

Бетон – от фр. *beton*, искусственный каменный строительный материал, полученный в результате твердения смеси из минеральных наполнителей.

История бетона берет свое начало за несколько тысячелетий до нашей эры, пол толщиной 25 см в хижине на берегу реки Дунай, считается одним из самых первых случаев применения бетона. Впоследствии, бетон был обнаружен во многих исторических сооружениях по всему миру, от гробницы Табесе в Египте до Великой Китайской стены [35].

Характерным отличием бетонов прошлых тысячелетий является различие вяжущих компонентов, которые зачастую зависели от территориальной принадлежности объекта. От красной глины и жирной земли, до смеси гипса и извести.

Однако, неразвитая материальная база, отсутствие знаний и необходимой инфраструктуры тормозило развитие бетона и следующего всплеска популярности пришлось ждать до появления и расцвета Римской Империи.

Классический бетон не удовлетворял имперским амбициям, и римляне превратили бетон из вспомогательного материала в основной, путем подмешивания в состав бетонной смеси вулканического пепла с холмов близ города Поццуоли. Вулканический пепел являлся в бетоне связующим веществом, за счет которого значительно повысилась прочность бетона.

В результате были воздвигнуты такие сооружения как Пантеон и Колизей, сохранившиеся и по наше время.

Падение Римской Империи, деградация науки и отказ от строительства монументальных зданий привело к очередному упадку использования бетона и только в период нового времени бетон стал возвращать утраченные

позиции, во многом благодаря работам французского инженера Л.Ж. Вика, который изобрел цементный клинкер и портландцемент [33].

Для получения портландцемента требуются известняк, глина и прочие составляющие, такие как железо. Ингредиенты дробятся в мельницах, после чего засыпаются в печь и подвергаются нагреву до 1480°C, расплавленная смесь образует новый материал – клинкер, который после остывания размалывается в цемент.

Технология получения бетона существенно не менялась с момента изобретения портландцемента. Вступая в реакцию с водой затвердения цемент подвергается химическому преобразованию – гидратации. В результате на поверхности каждой частицы цемента появляется ядро, которое растет, расширяется и соединяется с другими ядрами, после чего прилепляется к песку и дробленому камню. Затвердев бетон превращается в конструктивный элемент.

Ретроспективная схема развития бетона, предложенная А.В. Ушеров-Маршаком в его статье «Современный бетон и его технологии» [36], представлена на рисунке 1.

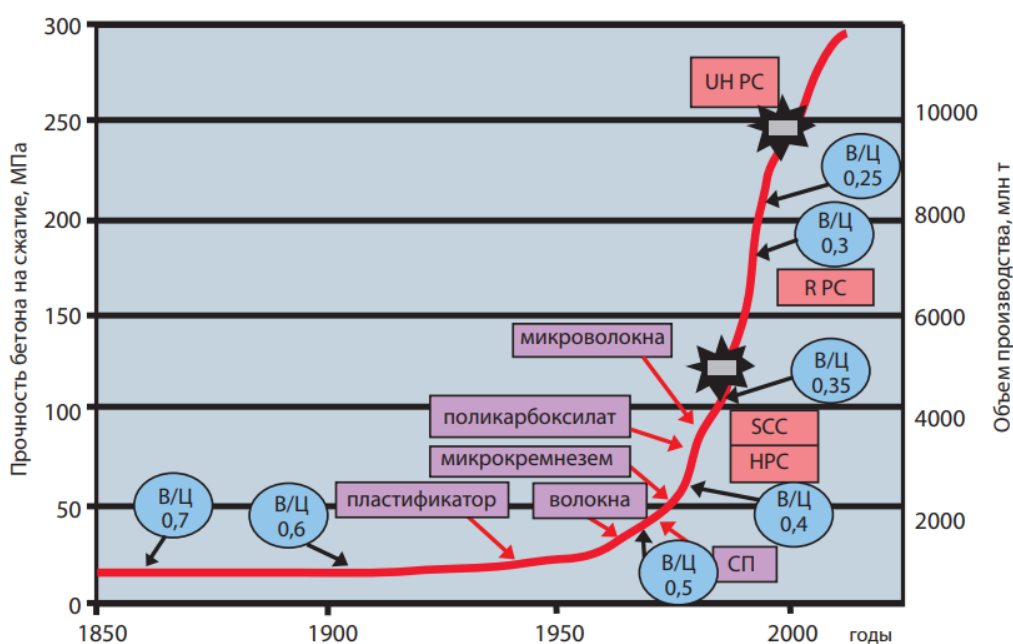


Рисунок 1 – Ретроспектива развития бетона

Как видно из предложенной схемы, в середине второй половины прошлого века произошел резкий скачок в развитии технологий бетона, обусловленный появлением в строительной индустрии пластификаторов и микронаполнителей, таких как микрокремнезем. Появление данных компонентов позволило получить высокопрочные бетоны НРС и самоуплотняющиеся бетоны SCC, которые можно объединить в категорию – «Бетоны нового поколения».

При этом, ошибочно думать об однозначном решении проблем технологии бетона, ведь несмотря на рост наукоемкости бетоноведения, предстоит решить еще множество задач общего и регионального планов. Одной из главных задач является адаптация местных сырьевых компонентов к новым технологиям [3].

Одним из перспективных бетонов нового поколения, пока еще не получившим массового признания является самоуплотняющийся бетон (СУБ).

«Самоуплотняющийся бетон (СУБ) (self-compacting concrete (SCC); selbstverdichtender Beton (SVB)): Бетон, который вследствие собственного веса течет и сам уплотняется, а также заполняет опалубку с арматурой, каналами, выемками и т.д. и при этом сохраняет свою однородность» [9].

История разработки данного бетона уходит в 80-е годы прошлого столетия, когда японский профессор из Токийского университета Х. Окамура и его коллеги К. Маекава и К. Озава для решения проблем, связанных с сокращением времени и трудозатрат на уплотнение бетонной смеси при строительстве масштабных объектов, а также повышением набора прочности в ранние сроки, объединили материалы, полученные при исследованиях реологии высокоподвижных бетонных смесей, введения дисперсных наполнителей для повышения прочности и трещиностойкости материала, создания новых химических модификаторов свойств бетона, получил новый вид бетона, который было решено назвать самоуплотняющимся (SCC – Self-Compacting Concrete).

Создание такого бетона прежде всего связано с разработками японских ученых и внедрением в практику суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов и полиакрилатов. В Европе большой вклад в развитие внесли ученые научной школы Марио Коллаперди, разработав суперпластификаторы нового поколения МАРЕИ [21, 38, 39, 40, 41, 42].

Первыми крупными объектами на которых была применена самоуплотняющаяся бетонная смесь являются висячий мост Акаси-Кайкё в Кобе и регазификационный терминал сжиженного природного газа в г. Осака. Решение о применении самоуплотняющегося бетона было принято из-за высокой озабоченности, что низкое качество самоуплотнения массивных и сложных конструкций может привести к существенному снижению их качества. Обеспечение должного качества вибрирования привело бы к необоснованному росту финансовых затрат и увеличило сроки строительства.

После успешного завершения строительства данных объектов, самоуплотняющимся бетоном заинтересовались и в Европе, немецкие производители ЖБИ могли обеспечить высокое качество заполнителей бетона и технологию производства, но для реализации данной идеи требовалась нормативная документация.

«В 1998 году прошла первая международная конференция, с участием более 150 ученых и инженеров из 15 стран. В 2003 году немецким комитетом по железобетону был выпущен нормативный документ «DAfStb-Richtlinie Selbsverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)» – в котором изложены термины и связи с прочими европейскими нормативными документами, методы диагностики СУБ. В 2004 году организован технический комитет 205-DSC «Долговечность самоуплотняющегося бетона», председателем которого является профессор Шуттер, для осуществления деятельности комитета задействовано 25 лабораторий в 14 странах» [4, 21]. В результате работы комитета была предложена следующая классификация самоуплотняющихся бетонов (рисунок 2).

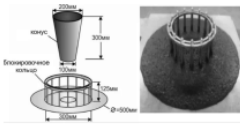

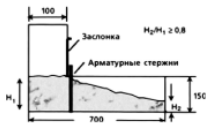
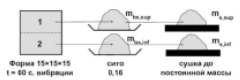
Наименование смеси	Обозначение	Технологическая характеристика	Величина характеристики
Высокоподвижная (Slump-flow)	SF1	Распływ конуса	550–650 мм
	SF2		660–750 мм
	SF3		760–850 мм
Вязкая (Viscosity)	VS1/VF1	Вязкость 	менее 8 секунд
	VS2/VF2		9–25 секунд
Легкоформируемая (Passing ability)	PA1	Формируемость 	Зависит от частоты армирования
	PA2		
Устойчивая к расслоению (Segregation resist.)	SR1	Расслаиваемость 	<20%
	SR2		<15%

Рисунок 2 – Классификация СУБ в Европе

Из данной классификации вытекает область применения каждого состава бетонной смеси:

- SF1 в низкоармированных конструкциях, плиты перекрытия, фундаменты, сваи;
- SF2 в опоры, ростверки, балки, применяемые в гидротехническом и дорожном строительстве, а также колонны и стены при монолитном строительстве;
- SF3 в густоармированных конструкциях, изделиях сложной формы, при высоких требованиях к качеству поверхности;
- VS1/VF1 соответствует SF3;
- VS2/VF2 соответствует SF1 и SF2;
- PA1 для высоких вертикальных конструкций, при домостроении и армировании конструкции с шагом 80-100 мм и более;
- PA2 для инженерных сооружений и при армировании конструкции с шагом 60-80 мм;

- SR1 вертикальные и высотные сооружения с шагом армирования до 80 мм и при растекании бетонной смеси до 5 м;
- SR2 стены и тонкостенные профили, с шагом армирования свыше 80 мм и при растекании бетонной смеси более 5 м.

1.2 Применение самоуплотняющихся бетонов в России и СНГ

История СУБ в России берет свое начало в 1995 году, когда группой сотрудников НИИЖБ им. А.А. Гвоздева включающей в себя Каприелова С.С., Шейнфельда А.В., Кардумянн Г.С., было основано ООО «Предприятие Мастер Бетон» [24]. Данное предприятие было создано с целью разработки, исследования и производства современных бетонов с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, а также производства добавок-модификаторов для таких бетонов [5].

Самоуплотняющиеся бетоны, разработанные данной организацией, были использованы при строительстве 14 высотных зданий «Москва-Сити», при непрерывном бетонировании массивных фундаментов, опор мостов, тоннелей и путепроводов в Москве и Казани, где решались проблемы обеспечения высокой ранней прочности и трещиностойкости конструкций [6].

С участием предприятия возводились гидротехнические сооружения в республике Башкирия на реке Белая, конструкции Белоярской АЭС на Урале. На данных объектах требовалось обеспечить высокую эксплуатационную надежность и долговечность бетона.

Общий объем самоуплотняющегося бетона классов В40-В100, уложенного организацией в период с 2008 по 2017 гг. составил более 300 тыс. м³, что составляет примерно 10 % от общего объема.

За более чем 20 лет компанией разработано несколько десятков различных модификаторов бетона и сухих смесей для ремонтных и строительных работ [24, 28, 31].

Основными продуктами компании, которые обрели широкую популярность являются:

- модификаторы бетона МБ 01;
- модификаторы бетона МБ-С;
- модификаторы бетона Эмбелит;
- модификаторы бетона Мабелит.

Модификаторы серии МБ основаны на сочетании золы-уноса и суперпластификатора С-3, снижают проницаемость и улучшают реологические свойства смеси. Стоимость за 1 тонну – 21000 рублей.

Модификаторы серии МБ-С включают в свой состав помимо золы-уноса и С-3 микрокремнезем. Стоимость составляет от 18000 до 20000 рублей за тонну.

Данные органо-минералогические добавки применялись при строительстве следующих объектов.

Футбольный стадион «Самара Арена» – требовалось разработать состав самоуплотняющегося бетона, для заливки опор (рисунок 3) и фундаментной плиты толщиной от 0,6 до 6,25 м, с характеристиками В35, W6, П5, СУБ объем бетона – 115400 м³.

В результате в качестве добавки в бетон был выбран продукт МБ 10-50С.



Рисунок 3 – Густоармированная конструкция опоры стадиона «Самара-Арена»

Юго-Западная водопроводная водопроводная станция в г. Москва – разработка регламентов, подбор бетона и оценка его прочности в конструкциях. Подбор бетона осуществлялся для бетонирования конструкции фундаментной плиты, колонн и стен (рисунок 4). Требуемые характеристики бетона В35, W12, F200, П5, СУБ. Объем – 15400 м³. В качестве добавки выбран МБ 10-01.



Рисунок 4 – Густоармированные конструкции стен

Спортивный комплекс «Крылатское» - г. Москва, 2003 год. Компанией был выполнен полный комплекс работ по научно-техническому сопровождению. Требовалось забетонировать монолитные конструкции главной опорной платформы ферм (рисунок 5), объемом 2500 м³. Требуемые характеристики бетона В55, W12, F300, П5, СУБ. В качестве модификатора бетона выбран МБ 10-01.

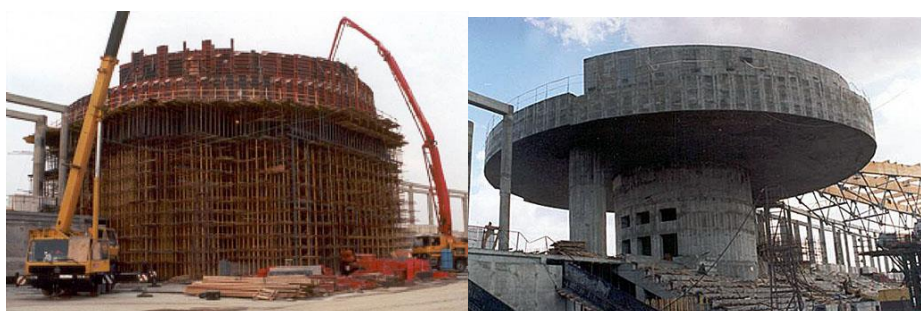


Рисунок 5 – Опорная платформа ферм

Аналогичный предыдущему комплекс работ был выполнен при строительстве офисного здания Телекомпании НТВ в г. Москва представленного на рисунке 6. На объекте осуществлялось бетонирование каркаса здания объемом 44000 м³. Требования к бетонной смеси: В40 из высокоподвижной самоуплотняющейся бетонной смеси. В качестве добавки принята МБ 10-50С.



Рисунок 6 – Элементы каркаса офисного здания

Благодаря деятельности компании за 20 лет на территории Российской Федерации было возведено более 200 уникальных объектов, произведено более 3,5 млн. м³ модифицированных бетонов и 300 тыс. тонн органо-минеральных модификаторов типа МБ.

Сэкономлено более 550 тыс. тонн цемента, в следствие чего предотвращено от попадания в атмосферу 550 тыс. тонн углекислого газа. Использовано в качестве добавок к бетону более 250 тыс. тонн пылевидных отходов ТЭС и металлургических предприятия.

Также стоит отметить положительный опыт использования СУБ в Республике Казахстан, где в 2017 году ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» совместно с строительным холдингом VI-Group производили работу над проектом создания и внедрения СУБ в строительный рынок РК [1].

«Основной задачей было проектирование состава бетонной смеси на местных сырьевых компонентах с использованием добавок на основе

поликарбонатных эфиров местного казахстанского производства и тонкодисперсных наполнителей – отходов техногенных производств» [1].

В результате практической работы по исследованию свойств СУБ были проведены исследования и приняты следующие решения. Во-первых, отказаться от использования в качестве минерального наполнителя доменного шлака и золы-уноса, поскольку их применение ведет к значительному расходу гиперпластификатора СЗ-ПФМ в количестве 2-2,5 % от массы вяжущего и применить микрокремнезем.

Во-вторых, ограничить применение микрокремнезема 10 %, поскольку большее количество микрокремнезема создает большое количество центров кристаллизации, происходит сильный рост внутреннего напряжения и в результате повышается риск образования трещин. Также такой расход МК позволяет сократить расход гиперпластификатора до 1 %.

Ученым из ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» удалось снизить В/Ц до 0,32 при распыле конуса 65-67 см, получить время истечения через V-образную воронку 7-9 секунд, бетон с такими характеристиками позволил получить изделие обладающее:

- категорией поверхности А1-А2;
- возможностью снятия опалубки уже на вторые сутки;
- прочность на 3 сутки 90-93 % от проектной прочности.

Применение самоуплотняющейся бетонной смеси при бетонировании монолитных колонн на стройках жилых домов в Нурсултане позволило получить суммарный экономический эффект 4-5 % на 1 м³ в сравнении с обычным бетоном В25.

Дальнейшему увеличению применения бетонов нового поколения, в том числе включающих в себя самоуплотняющиеся бетоны должно поспособствовать введение в действие новых стандартов ГОСТ разработанных НИИЖБ им. А.А. Гвоздева совместно с ОАО «НИЦ Строительство» [10, 11, 12, 15, 16].

В 2020 году введен в действие ГОСТ Р 58894-2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и растворов. Технические условия», распространяющийся на активную минеральную добавку техногенного производства, обладающую высокой пуццоланической активностью микрокремнезем конденсированный, предназначенный для регулирования свойств бетонных и сухих смесей приготовленных на основе портландцементного клинкера.

В 2021 году введен в действие ГОСТ Р 595362-2021 «Метакаолин для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Метакаолин как высокоактивная минеральная добавка сульфоалюминатного действия.

В 2021 и 2022 году введены ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» и ГОСТ Р «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытания». Данные стандарты распространяются на СУБ для использования их при возведении монолитных конструкций, сборных бетонных, железобетонных и фибробетонных конструкций.

Согласно ГОСТ Р 59714-2021 основными показателями качества СУБ являются удобоукладываемость и расслаиваемость, вспомогательными – вязкость и текучесть. В классификации нашего ГОСТ приняты следующие марки по удобоукладываемости:

- РК1 – 55-65 см, допустимое отклонение ± 5 см;
- РК2 – 65-75 см, допустимое отклонение ± 4 см;
- РК3 – 75-85 см, допустимое отклонение ± 3 см.

Расслаиваемость должна быть не более 15 % для РК1, 17,5 % для РК 2, 20 % для РК3, также допускается определять расслаиваемость визуально.

Опираясь на опыт промышленно развитых стран, выглядит перспективным применение СУБ при производстве ЖБИ в заводских условиях, так в Евросоюзе применение СУБ на заводах сборного железобетона составляет до 50 %. Внедрение такого бетона на производстве

позволяет значительно повысить качество бетонных работ, снизить их трудоемкость и улучшить условия труда [23, 29].

Улучшение условий труда достигается за счет снижения уровня шума и вибрации, вследствие отказа от вибрирования, а в условиях замкнутого заводского пространства такое улучшение является еще более актуальным. Качество бетонных работ повышается за счет отсутствия длительной транспортировки бетонной смеси до объекта, следовательно, многократно уменьшаются риски потери подвижности или «переразжижения» смеси в следствие применения поликарбонкислатных пластифицирующих добавок.

В России объемы производства ЖБИ сопоставимы с объемом производства товарного бетона, основными потребителями являются Центральный, Приволжский (куда входит и Самарская область) и Сибирский федеральные округа.

Структура производства ЖБИ по видам представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Структура производства ЖБИ согласно анализу «ПКР»

Согласно аналитики проведенной в 2018 году «ПКР» в ближайшее десятилетие ожидается краткосрочный рост порядка 15 % производства ЖБИ и в долгосрочной перспективе 5-10 %. Наибольший прирост ожидается в ПФО и ЦФО.

Для удовлетворения роста числа и качества выпускаемой ЖБИ продукции в ПФО на территории города Тольятти в 2021 году был введен в эксплуатацию завод ЖБИ «Флоркон», цех которого представлен на рисунке 8, объем инвестиций составил 750 млн. руб.

Особенностью данного производства является применение самоуплотняющегося бетона. Бетоносмесительный участок сделан по технологиям Финских заводов и заточен именно под СУБ.

Изготовление ЖБИ на заводе осуществляется стендовым способом, однако для повышения конкурентоспособности для проекта выбраны регулируемые формы, для возможности оперативного перехода на выпуск изделий других типоразмеров. На заводе используются смесители объемом 2 м³, время замеса составляет не более 5 минут.

Номенклатура производства: колонны, балки, лестничные марши, стеновые панели (однослойные и трехслойные различного назначения), фундаментные стаканы. Плановая производительность 29 тыс. м³ ЖБИ в год.

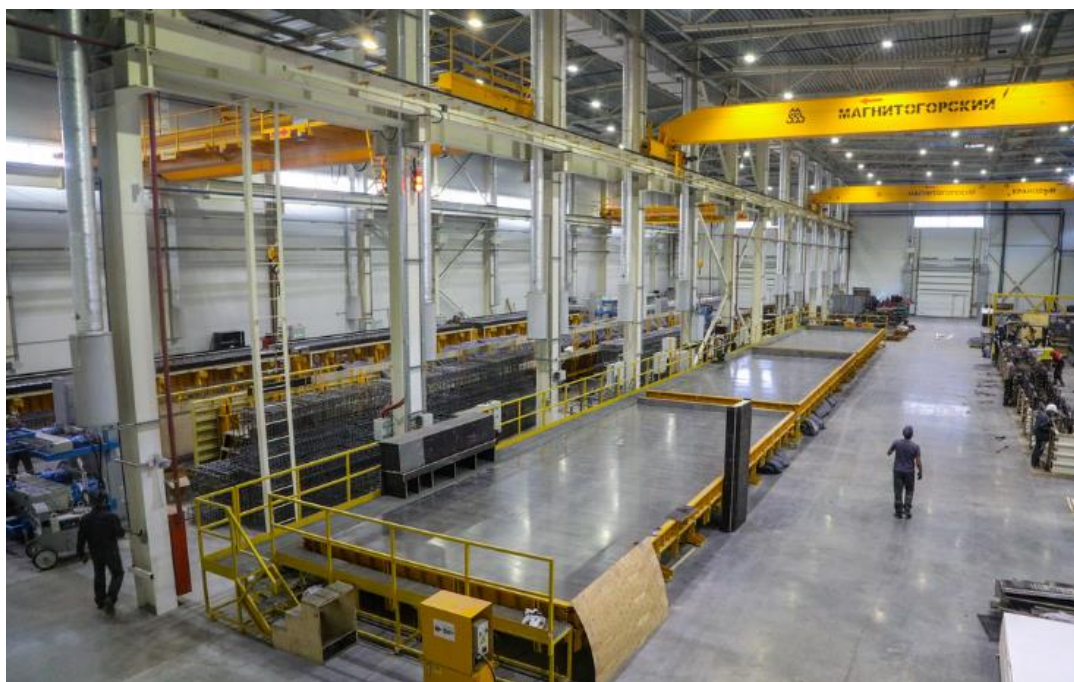


Рисунок 8 – Цех завода «Флоркон»

Первая партия изделий была использована компаний PNK Group, которая в наше время строит в г. Чапаевск Самарской области логистический центр и склад для интернет-маркетплейса Ozon.

1.3 Особенности рецептуры самоуплотняющихся бетонов

Разработка новых высокоэффективных модифицирующих добавок предопределила новые тенденции в развитии бетоноведения – повышение эффективности использования цементов в составе бетонных смесей, повышение эффективности использования отходов и побочных продуктов металлургической промышленности и топливно-энергетического комплекса [34].

Алгоритм подбора рецептуры модифицированных бетонов, в том числе и самоуплотняющихся приведен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Алгоритм подбора рецептуры

Основные моменты при расчете состава самоуплотняющегося бетона:

– для лучшей тиксотропии применяется крупный заполнитель фракции 5-10 мм или 0-5 мм, но не более;

- песок подбирается так, чтобы получить лучшую заполняемость и упаковку, но $M_{кр}$ должен быть не менее 2;
- соотношение мелкого и крупного заполнителей 50/50, 60/40;
- для тиксотропного, в меру вязкого СУБа количество вяжущего должно быть не ниже 450-500 кг, в идеале 550-650 кг;
- применение микрозаполнителей, таких как микрокремнезем, шлак, зола-уноса, минеральный порошок;
- грамотное использование и дозирование поликарбоксилатных гиперпластификаторов, суперпластификаторов.

1.3.1 Минеральные добавки (микрозаполнители) в самоуплотняющемся бетоне

Минеральная добавка (МД) – дисперсный неорганический материал, вводимый в бетонную смесь для регулирования и изменения реологических свойств или придания ей новых свойств. По происхождению минеральные добавки различаются на природные и техногенные.

Природные МД являются пуццолнами различного происхождения:

- осадочного происхождения (трепелы, опоки);
- вулканического происхождения (пеплы, туфы, вулканические шлаки);
- природные обожженные (глиежи).

Техногенные МД:

- доменные гранулированные шлаки;
- метаксаолин;
- микрокремнезем;
- зола-уноса;
- обожженный сланец.

По активности минеральные добавки разделяются на 2 вида:

- активные минеральные добавки (АМД);
- инертные минеральные добавки (ИМД).

Согласно европейскому опыту минеральные добавки в бетоне применяются в трех направлениях.

Filler – наполнители, используются для заполнения пор.

Nucleating – центры кристаллизации, ускоряют гидратацию и структурообразование.

Pozzolanic – заменители цемента, обладающие пуццоланической активностью, данные добавки применяются наиболее широко. Принцип их действия в следующем, микронаполнитель вступает в реакцию с гидроксидом кальция из гидратирующего цемента $SiO_2 + CH \rightarrow CSH$, снижая количество CH и увеличивая CSH , ответственного за развитие прочности бетона.

Требования, которые предъявляются к материалам с пуццоланической активностью:

- $SiO_2 + Al_2O_3 + FeO_x \geq 70\%$;
- удельная поверхность $\geq 300 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- удельная поверхность должна быть больше, чем у используемого цемента.

Сравнение химического состава портландцемента и минеральных добавок приведено на рисунке 10.

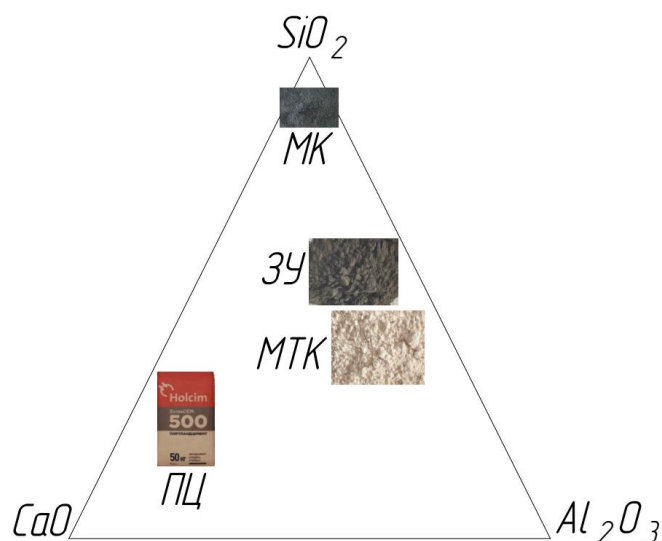


Рисунок 10 – Химический состав вяжущих элементов

Как видно из рисунка 10 из всех представленных АМД микрокремнезем является монокомпонентной добавкой, зола-уноса и метакаолин – многокомпонентными.

Выбирая микронаполнитель для бетонной смеси, требуется анализ его свойств и показателей качества, первичная цепочка подбора представлена на рисунке 11.

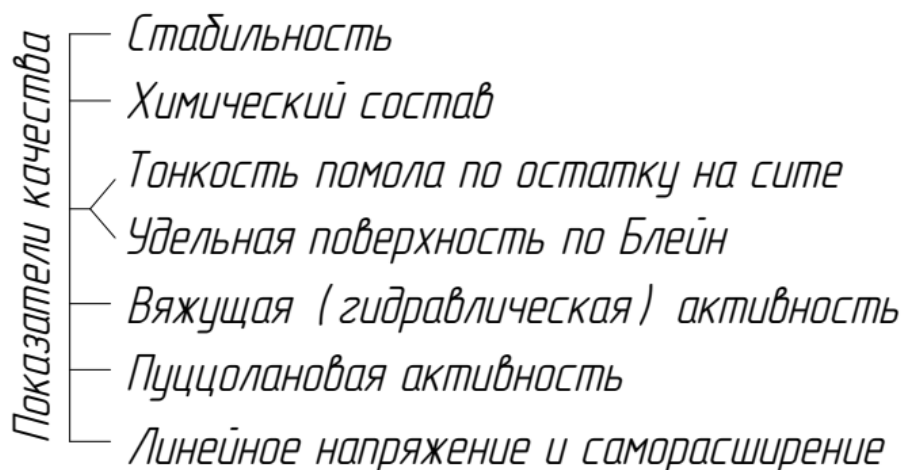


Рисунок 11 – Подбор микронаполнителя

Главный показатель качества – стабильность получаемого сырья от поставщика, для этого поставщик должен обладать материальной и сырьевой базой, а также своими собственными центрами испытаний.

Химический состав – требуемое по ГОСТ содержание кальция, кремния, алюминия в микронаполнителе.

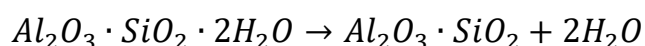
Тонкость помола и удельная поверхность по Блейну должны оцениваться вкуче, главный показатель – плавная или пиковая гранулометрия.

Вязущая активность определяется с помощью оборудования для испытания цемента (двухдиапазонный пресс).

Если предыдущие критерии удовлетворяют, то в химической лаборатории проверяется пуццолановая активность, для расширяющих добавок также определяется их линейное напряжение и саморасширение.

Метакаолин в качестве минеральной добавки.

Метакаолин – продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата). Получается путем обжига при температурах 650 – 850°C и дальнейшего помола, продукт обладает высокими эксплуатационными характеристиками, может применяться в тяжелых, мелкозернистых, самоуплотняющихся бетонах, а также при производстве сухих строительных смесей.



В качестве рыночного продукта и добавок используется продукт высокоактивный метакаолин (ВМК).

«Метакаолин (дегидратированный аморфный алюмосиликат) по своей сути является высокоактивным природным пуццоланом, то есть гидравлически-активной добавкой, способной при взаимодействии с известью $Ca(OH)_2$ образовывать нерастворимые, низкоосновные гидроалюмосиликаты кальция.

Применение метакаолина в бетонных смесях ведет к модификации структуры цементного камня в затвердевшем бетоне, а именно к ее уплотнению» [26].

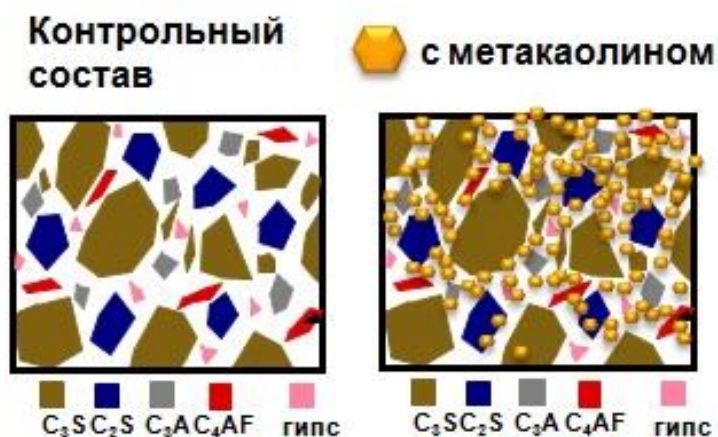


Рисунок 12 – Структура цементного камня с использованием метакаолина

Это достигается благодаря тому, что средний медианный размер зерен ВМК на порядок меньше тонины вяжущего вещества, что позволяет говорить об эффекте «микробетона», то есть заполнении межзеренных пустот ПЦ частицами АМД (рисунок 12). В результате наблюдается существенное уплотнение структуры образующихся при твердении гидратных новообразований, что ведет к повышению плотности, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и долговечности бетона.

В самоуплотняющихся бетонах обязательным условием является применение метакаолина (ВМК) совместно с пластификатором, то есть комплекс «пластификатор + тонкодисперсная АМД», наиболее эффективным является применение пластификаторов на поликарбоксилатной основе. Работая вместе с пластификатором метакаолин изменяет реологические свойства смеси, позволяет снизить расход цемента, добиться улучшенной консистенции, связности и удобоукладываемости.

«Также стоит ответственно подходить к выбору дозировки ВМК в бетоне, рекомендации зарубежных производителей позволяют вводить метакаолин в дозировках до 20 %, однако переизбыток метакаолина приведет к следующим негативным последствиям:

- при недостатке извести и прочих материалов с которыми мог бы прореагировать ВМК, он становится инертным и только снижает прочность бетона;

- высокие дозировки ВМК существенно изменяют гранулометрию состава, избыток тонкодисперсной фракции также негативно сказывается на свойствах бетона и способен снизить прочностные характеристики» [26].

Оптимальной является дозировка 5-15 % в зависимости от требований к готовой смеси.

Мировые запасы каолинитового сырья оцениваются приблизительно 16 млрд. тонн, доля России от общего количества составляет примерно 5 %. Основным источником каолинита в России является карьер Журавлиный Лог

в Челябинской области (рисунок 13), поставщиком ООО «Пласт-Рифей» и ООО «СИНЕРГО» [25, 27].



Рисунок 13 – Карьер Журавлиный Лог

Толчком к увеличению масштабов потребления должно стать открытие в ближайшее время крупного месторождения в Светлинском районе Оренбургской области, с запасами около 400 млн. тонн. Планируется также строительство фабрики по обогащению каолинов и производству на их основе метакАОлина, шамота и кварцевого песка. Мощность производства более 2 млн. тонн.

Стоимость метакАОлина варьируется в зависимости от его вида и варианта поставки.

В розничной продаже представлен в мешках массой 18 кг и средней стоимостью 1500 руб.

Оптовая цена за тонну составляет в среднем 40000 руб.

Микрокремнезем в качестве минеральной добавки.

Микрокремнезем (SiO_2) – ультрадисперсный диоксид кремния в аморфном состоянии, обладающий высокой пуццоланической активностью и состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки технологических печей при производстве кремния и ферросилиция. Самая высокая эффективность при использовании

микрокремнезема являющимся отходом производства кристаллического кремния, ферросилиция и ферросилихрома, низкая эффективность – феррохрома и силикомарганца. Первые сведения датированы 50-ми годами прошлого века, тогда же был зарегистрирован первый патент модификации цементных систем путем использования микрокремнезема.

Гранулометрический состав МК свидетельствует о том, что размер большинства частиц не превышает 1 микрона, а средний размер составляет 0,1 микрона, что в 100 раз меньше среднего ядра цемента.

Микрокремнезем бывает и поставляется в трех видах:

- неуплотненный, плотность порядка 150-250 кг/м³;
- уплотненный, плотность порядка 550-850 кг/м³ (средняя плотность цемента 1500 кг/м³);
- суспензия, плотность до 1350 кг/м³;

Сложность использования микрокремнезема заключается в его низкой плотности – 250 кг/м³, перевозка такого материала не безопасна и экономически нецелесообразна, можно сравнить с перевозкой воздуха. Поэтому он подвергается уплотнению, после чего его плотность становится 550-850 кг/м³, однако снижается его пуццоланическая активность. Лучшим вариантом является использование суспензии, в таком случае плотность микрокремнезема составляет до 1350 кг/м³ и он имеет наибольшую пуццоланическую активность по сравнению с порошкообразным МК.

Мелкий гранулометрический состав и высокая удельная поверхность, обуславливают высокую пуццоланическую активность данного материала и позитивное влияние МК на свойства бетона.

«Кремнезем вступает в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа *CSH*.

Влияние МК на формирование структуры цементной системы зависит от двух факторов – физического и химического.

Применение МК оказывает существенное влияние на поведение цементной системы на стадии коагуляционного структурообразования (когда система находится в пластическом состоянии). Особенности системы с использованием микрокремнезема состоит в заполнении ультрадисперсными частицами пространства между грубодисперсными частицами цемента (рисунок 14, 15), а также в уменьшении объема свободной воды в системе (за счет увеличения адсорбционно-связанной) резко изменяют реологические свойства. Повышается вязкость, пластичность, связность и тиксотропность смеси. Также использование МК оказывает положительное на позднюю стадию – кристаллизационную, заполнив поры в структуре твердеющего камня он способствует повышению его плотности» [28].

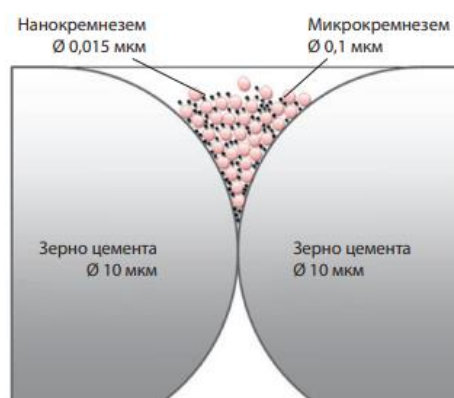


Рисунок 14 – Заполнение межцементного пространства

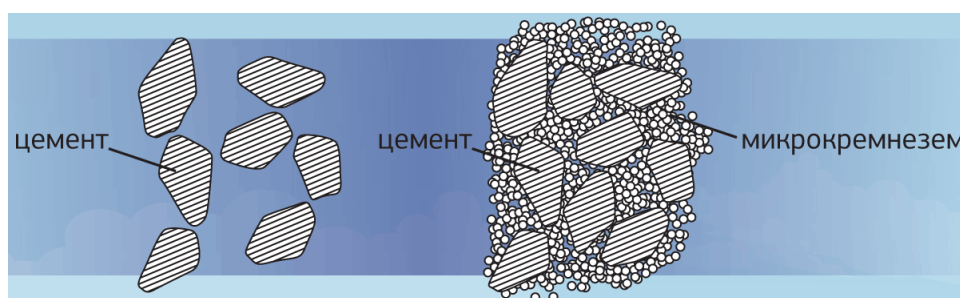


Рисунок 15 – Структура цементного камня с использованием микрокремнезема

Химический фактор состоит в применении пластификаторов вместе с микрокремнеземом, их совместное влияние на цементную систему

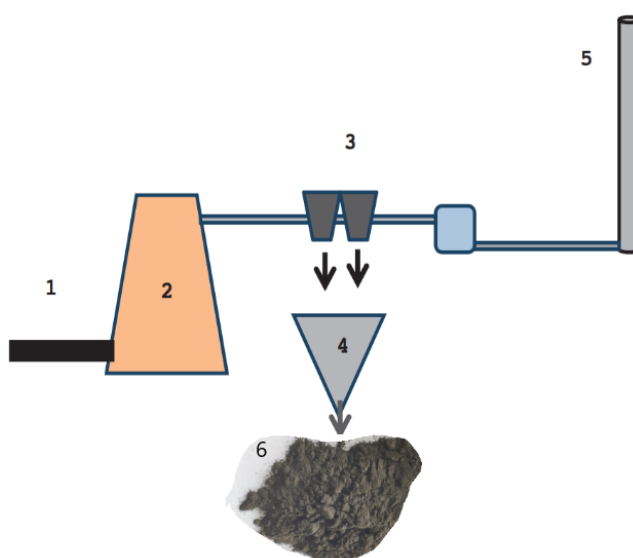
выражается в том, что на ранней стадии система обретает повышенную вязкость и связность (повышенное содержание $CSH(1)$), а на поздней стадии цементный камень характеризуется особым качественным составом и особой геометрией структуры (повышенное содержание гелевых пор и сокращенное капиллярных).

Строительный рынок (39 %) – занимает большую долю в использовании микрокремнезема, по данным аналитиков DISCOVERY объем производства микрокремнезема в России в 2019 году составил порядка 150 тыс. тонн.

В 2022 году крупнейший Российский металлургический комбинат НЛМК запустил в продажу микрокремнезем конденсированный МК-85 и МКУ-85 по цене 13680 руб. за тонну.

Зола-уноса в качестве минеральной добавки.

Зола-уноса – мелкозернистая пыль, образующаяся при сжигании антрацитов или каменного угля на электростанциях (рисунок 16) и состоящая из шарообразных, стекловидных частичек, обладает пуццолановыми свойствами.



1 – уголь, 2 – котел, 3 – фильтр, 4 – бункер, 5 – газы, 6 – зола-уноса.

Рисунок 16 – Схема получения золы-уноса

Состоит в основном из активного диоксида кремния (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3), остальное – оксид железа (Fe_2O_3) и другие соединения.

Содержание оксида кальция (CaO) в золе должно быть не более 10%.

Активного диоксида кремния (SiO_2) минимум 25 %.

Индекс активности золы через 28 суток должен составлять не менее 75 %, через 90 суток – не менее 85 %.

Водопотребность золы не должна превышать 95 %.

«Применение золы-уноса позволяет повысить плотность бетона, а ее шарообразная форма придает ей свойство, получившее название «шарикоподшипниковый эффект», благодаря которому улучшается скольжение цемента и мелкого заполнителя по поверхности золы. Подобное реологическое влияние можно сравнить с эффектом, получаемым при использовании пластификаторов, оно позволяет уменьшить количество воды в бетоне, повышает плотность и прочность бетона.

Также повышение прочности бетона осуществляется благодаря пуццолановой реакции (гидравлической активности золы), при которой взаимодействуют содержащиеся в золе аморфный оксид кремния и оксид алюминия с гидроксидом кальция, образующейся при гидратации цемента, в результате чего формируется фаза *CSH*» [22].

Дополнительное образование *CSH* благоприятно влияет на долговечность бетона, замедленная реакция гидратации благодаря введению золы ведет к росту новообразующихся кристаллов, что способствует химическому уплотнению и уменьшению пор в затвердевшем бетоне, а также их более равномерному распределению в затвердевшем бетоне.

В соответствии с ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» золы в зависимости от химического состава подразделяют на типы:

– кислые (К) – антрацитовые, каменноугольные и бурогольные, содержащие оксид кальция до 10 % масс;

– основные (О) – буроугольные, содержащие оксид кальция более 10 % масс.

Зола используется при изготовлении железобетонных конструкций и изделий из тяжелого, мелкозернистого, самоуплотняющегося и легкого бетонов, строительных растворов, для изделий и конструкций из ячеистого бетона, бетонных и железобетонных изделий и конструкций, работающих в особо тяжелых условиях (гидротехнические сооружения, дороги, аэродромы и др.).

Использование золы-уноса в сочетании с новейшими химическими добавками (суперпластификаторами, воздухововлекающими добавками) приводит к получению бетона с высокой прочностью и долговечностью (морозостойкостью). В этом отношении открывается широкий фронт дальнейших исследований, направленных в основном на повышение долговечности бетона. Кальциевая зола-уноса пока не стандартизована в Европе в отличие от США и Канады. Требования к этому типу золы-уноса содержатся в стандарте США ASTM C618 -12 и стандарте Канады CAN/CSA-A23.5-98. В стандарте по цементу PN-EN 197-1 зола-унос подразделяется на две группы:

- кремниевая зола-уноса, обозначаемая буквой V;
- кальциевая зола-уноса, обозначаемая буквой W.

Первая (кремниевая) зола-уноса обладает пуццолановыми свойствами, вторая (кальциевая) вдобавок может иметь гидравлические свойства. По потерям при прокаливании золы-уноса подразделяются на следующие категории:

- до $\leq 5,0$ % по массе;
- до $\leq 7,0$ % по массе;
- до $\leq 9,0$ % по массе.

Применение золы-уноса при производстве бетонов, строительных смесей и архитектурных изделий малых форм зачастую является обязательным условием в Евросоюзе, где ведется «зеленая политика», а

уровень утилизации продуктов горения угля довели до 100 %. Использование золы-уноса в качестве АМД позволяет с пользой «утилизировать» данный отход производств, во-вторых, применение золы-уноса позволяет существенно снизить расход цемента, производство которого также негативно сказывается на окружающей среде из-за огромных выбросов в атмосферу углекислого газа, образующегося при его производстве.

Ежегодно в Германии используется более 3 млн. тонн золы-уноса в роли АМД для бетона и видится актуальным ее применение и в России, где только на одной из множества ТЭС – ТЭС ОАО «Иркутскэнерго» за годы работы накопилось более 80 млн. тонн золошлаковых отходов и прирост каждый год составляет порядка 2 млн. тонн.

Стоимость 1 тонны золы-уноса в РФ варьируется в зависимости от поставщика и составляет в среднем 500 руб.

1.3.2 Пластификаторы в самоуплотняющемся бетоне

«Появление в 60 – 70-х годах прошлого века суперпластификаторов привело к «химизации» бетона, воздействуя на процессы формирования структуры, особенно на начальной – коагуляционной стадии, СП изменяют реологические свойства цементной системы, способствуют снижению водопотребности, что в дальнейшем ведет к изменению кристаллизационной структуры» [28]. Благодаря использованию СП стало возможным применение пластичных смесей с $OK > 20$ см и высокой прочностью (50 МПа и более) на обычных портландцементных заполнителях, а также снижение расхода цемента и энергоресурсов.

«Суперпластификаторы представляют собой полиэлектролиты органического происхождения (поверхностно-активные вещества – ПАВ), которые функционируют как дисперсная химическая среда в гетерогенных системах» [21].

Классификация и относительная стоимость пластификаторов приведены на рисунке 17.


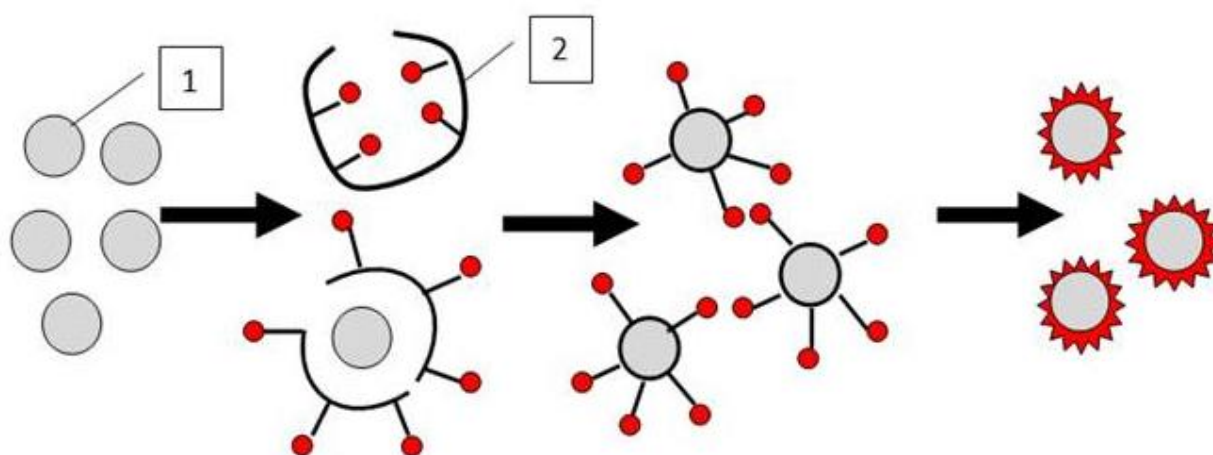
	<i>состав</i>	<i>механизм действия</i>	<i>цена, %</i>	
<i>НФ</i>	<i>нафталин-формальдегидные поликонденсаты</i>	<i>электростатический</i>	<i>40</i>	
<i>МФ</i>	<i>меламин-формальдегидные поликонденсаты</i>	<i>электростатический</i>	<i>80</i>	
<i>ЛСТ</i>	<i>лигносульфонаты</i>	<i>электростатический</i>	<i>20</i>	
<i>П</i>	<i>поликарбоксилаты (полиакрилаты)</i>	<i>стерический</i>	<i>100</i>	

Рисунок 17 – Классификация пластификаторов

«В механизме действия суперпластификаторов НФ, МФ и ЛСТ преобладает эффект электростатического отталкивания частиц цемента и стабилизации (рисунок 18), вызванный тем, что адсорбционные слои из молекул добавки увеличивают величину ξ – потенциала на поверхности цементных частиц до величины $-23...-28$ мВ» [21].



1 – частицы цемента, 2 – молекула добавки.

Рисунок 18 – Процесс диспергирования при использовании суперпластификаторов

При использовании суперпластификаторов типа П диспергирование и адсорбция цементных паст обеспечивается за счет сильного стерического

эффекта отталкивания цементных частиц. Процесс диспергирования (разжижения) вследствие стерического эффекта представлен на рисунке 19.

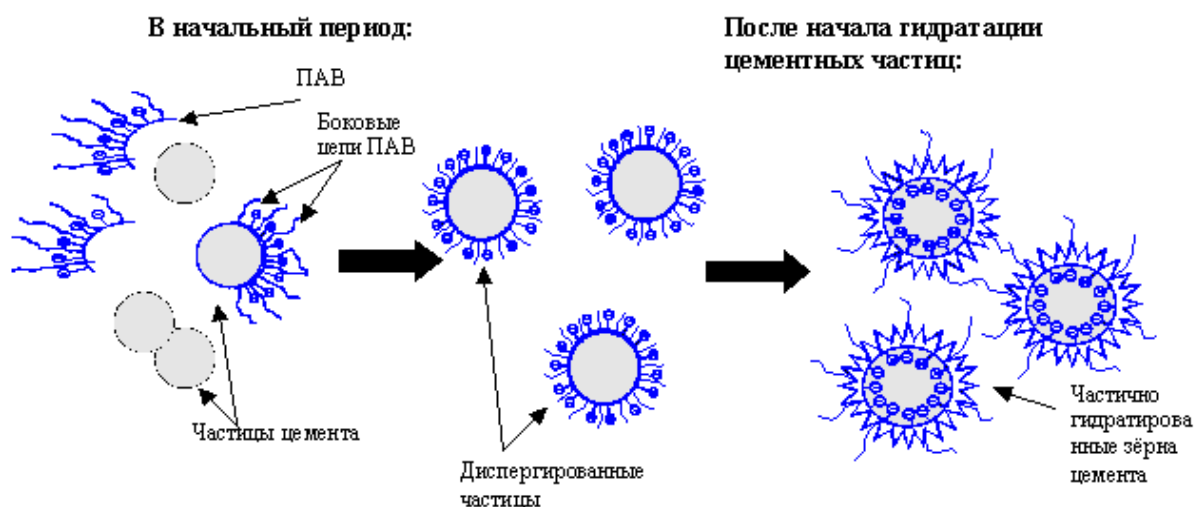


Рисунок 19 – Процесс диспергирования при использовании поликарбоксилатных пластификаторов

«За счет боковых гидрофобных полиэфирных цепей молекул поликарбоксилатного эфира (П) продолжительность их действия в 3-4 раза дольше по сравнению с НФ, МФ и ЛСТ. Данная особенность позволяет повысить подвижность не только в ранние сроки, но и сохранить ее в течение больше периода времени по сравнению с обычными суперпластификаторами, что положительно сказывается на сроках транспортировки (можно не беспокоиться что смесь потеряет подвижность)» [21].

Также различна и величина водоредуцирующего эффекта.

- поликарбоксилатных эфиров (П) 30-40 %;
- ЛСТ до 15 %;
- НФ, МФ до 25 %.

Суперпластификаторы первого-второго поколения (ЛСТ, НФ, МФ) эффективны в подвижных бетонных смесях, однако дают слабый эффект при низком содержании воды затворения, в тоже время, современные пластификаторы (гиперпластификаторы на поликарбоксилатной основе)

позволяют обеспечить высокий пластифицирующий эффект даже в смесях, где В/Ц отношение находится в пределах 0,2-0,3.

Гиперпластификаторы оказывают наиболее сильное влияние на реологию бетонной смеси и имеет самую высокую цену среди пластификаторов, но не лишены недостатков:

- проблема совместимости с цементами различного состава;
- высокая чувствительность к низким температурам;
- повышенное воздухововлечение, что негативно сказывается на прочности, поэтому иногда целесообразно вводить добавки подавляющие данный процесс.

Различными авторами отмечено, что введение МД совместно с СП (ГП) обеспечивает меньшие потери подвижности бетонной смеси в течение первых часов после приготовления, чем без МД. Модифицирование МД позволяет изменять природу их поверхности (гидрофильность, электрический заряд и пр.), активировать процесс структурообразования цементных дисперсий и формирование микроструктуры цементного камня.

Помимо пластифицирующих добавок есть широкий ряд различных модификаторов бетона, среди которого можно выделить гидрофобизирующие добавки (ГФ), которые актуально добавлять в СУБ при строительстве мостов, опор и прочих гидротехнических сооружений.

Гидрофобизация бетона при введении ГФ происходит за счет адсорбции молекул гидрофобизатора на поверхности гидратирующих цементных частиц.

В отличие от минеральных наполнителей, пластифицирующие добавки широко представлены на российском рынке и не представляет сложности купить их в розницу или оптом, причем от различных отечественных и иностранных производителей.

Наиболее популярными являются добавки следующих производителей: Полипласт, Sika, Stachement, BASF, MC-Bauchemie.

Стоимость данных пластификаторов зависит от их состава и показания к применению, и может составлять от нескольких десятков тысяч за тонну до нескольких миллионов рублей.

Выводы по первой главе:

– Самоуплотняющийся бетон является бетоном нового поколения, способен уплотняться под действием собственного веса, применяется при гидротехническом строительстве, в густоармированных конструкциях и при невозможности провести вибрирование бетонной смеси.

– Внедрение таких нормативных документов как ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия», ГОСТ Р «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытания», ГОСТ Р 58894-2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и растворов. Технические условия», ГОСТ Р 595362-2021 «Метакаолин для бетонов и строительных растворов. Технические условия» должно помочь в решении проблемы масштабного применения самоуплотняющихся бетонов в России.

– В результате анализа литературных источников по теме диссертации установлено, что оптимальное сочетание минеральных добавок и пластификаторов в самоуплотняющемся бетоне позволяет управлять его реологическими свойствами, модифицировать структуру и свойства.

2 Методы испытаний и характеристика используемых материалов

2.1 Методы испытаний

Опытно-экспериментальная часть магистерской диссертации выполнена в лаборатории ЦАКРиОС ФГБОУ ВО Тольяттинского Государственного университета.

Исследования качества исходных строительных материалов и бетона проводилось в соответствии с актуальными требованиями нормативных документов [7]- [19].

В качестве мелкого заполнителя для самоуплотняющегося бетона использовался Камский песок и дробленый песок из гранодиоритов. Качество данных материалов было определено согласно методике, изложенной в ГОСТ 8735–88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Зерновой состав используемых песков был определен путем просева песков через стандартный набор сит с диаметрами 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16, <0,16 мм.

По итогам испытаний определен «частный остаток на сите по формуле 1:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса просеиваемой навески, г» [13].

«Полный остаток на каждом сите определен по формуле 2:

$$A_i = a_5 + a_{2,5} + a_{1,5} + \dots + a_i, \quad (2)$$

где $a_5, a_{2,5}, a_i$ – частные остатки на соответствующих ситах» [13].

«Модуль крупности определяется по формуле 3:

$$M_k = \frac{A_5 + A_{2,5} + A_{1,5} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}, \quad (3)$$

где $A_5, A_{2,5}, A_{1,5}, A_{0,63}, A_{0,315}, A_{0,16}$ – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметрами 5, 2,5 и ситах с сетками 1,5 – 0,16 мм» [13].

«После определения остатков и модуля крупности выполняется установление насыпной плотности, путем взвешивания песка в мерных сосудах. Насыпная плотность по определена по формуле 4:

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (4)$$

где m_i – масса мерного сосуда, кг;

m – масса мерного сосуда с песком, кг;

V – вместимость сосуда, м³» [13].

Производство и испытание образцов осуществлялось партиями. Бетонные образцы были испытаны на прочность при сжатии и изгибе.

Оценка удобоукладываемости бетонной смеси была определена в соответствии с требованиями ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний» и ГОСТ 59714–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия».

«С учетом того, что самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются повышенным содержанием пластифицированной суспензионной составляющей, основным критерием эффективности данной рецептуры является полнота использования пластифицирующих и водоредуцирующих возможностей суперпластификаторов, позволяющих формировать малоструктурные агрегативноустойчивые суспензии с предельно-высокой концентрацией твердой фазы, низкими значениями предельного напряжения сдвига и пластической вязкости при высокой гравитационной текучести под действием собственного веса (расплыв из стандартного конуса (ГОСТ 10181)

и конуса Хегерманна (ГОСТ 310.4) – не менее 550 и 280 мм соответственно). При этом эффективность пластифицирующих добавок будет зависеть от многих факторов – способа введения и оптимальной дозировки разжижителя, реологической активности применяемых наполнителей и др.» [2].

Пример расплыва смеси приведен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Расплыв на конусе Хегерманна и конусе Абрамса

Расплыв нормального конуса (РК) бетонной смеси, полученный в результате опыта является показателем, которым характеризуется удобоукладываемость смеси СУБ, погрешность может составлять не более 0,5 см. «Для определения расплыва используют базовую плиту из коррозионостойкого материала размером 900×900 мм и нормальный конус высотой 300 мм. Базовая плита устанавливается на ровную поверхность, непосредственно перед началом испытания ее поверхность слегка смачивается мокрой тряпкой, конус устанавливается на центр базовой плиты и плотно удерживается с помощью упоров или давления рук. Далее происходит заполнение конуса, уплотнение не производится, излишки бетонной смеси аккуратно удаляются. Плавным движением за 1-3 секунды поднимается конус, без препятствия для расплыва бетонной смеси. После того как бетонная смесь стабилизируется, фиксируют самый большой диаметр расплыва D_1 , затем измеряют диаметр D_2 под прямым углом к D_1 и определяют расплыв нормального конуса по формуле 5:

$$PK = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad (5)$$

где D_1 – максимальный диаметр расплыва, мм;

D_2 – диаметр расплыва в перпендикулярном направлении, мм» [15].

Сразу после определения удобоукладываемости бетонной смеси, происходит ее укладка в кубические формы, сделанные из металла, с размером ребра – 70 мм, смесь покрывают влажной тканью для исключения испарения влаги из нее. «Температура помещения в котором находятся исследуемые образцы должна быть в пределах $20 \pm 5^\circ\text{C}$, через 24 часа образцы извлекают из форм, после чего помещают их в камеру для твердения на 28 суток, при нормальных условиях – температура в пределах $20 \pm 5^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $95 \pm 5\%$)» [15].

После получения готовых образцов размерами $70 \times 70 \times 70$ мм и $40 \times 40 \times 160$ мм (формы для получения образцов приведены на рисунке 21) происходит испытание – определение прочности на сжатие и при изгибе самоуплотняющегося бетона.



Рисунок 21 – Формы, используемые для проведения эксперимента

Предел прочности определяется согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», разрушающим

методом на гидравлических прессах МОД П-50 и ИП6010-100-1, прессы представлены на рисунке 22.



Рисунок 22 – Прессы МОД П-50 и ИП6010-100-1

«Прочность на сжатие определена по формуле 6:

$$R_{\text{сж}} = \frac{P}{F}, \quad (6)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м²» [15].

Прочность при изгибе определена по формуле 7:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (7)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН;

l – расстояние между опорами, см;

b, h геометрические размеры призмы, см» [15].

2.2 Используемые материалы

2.2.1 Цемент

Для изготовления самоуплотняющегося бетона с комплексными добавками использован портландцемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5.

Данный цемент хорошо зарекомендовал себя на строительном рынке, он подходит для широкого спектра работ, от устройства стяжки пола до строительства фундаментов, колонн и перекрытий. Данный цемент производится в соответствии с ГОСТ 31108-2016 и ГОСТ 30515-2013. В состав этого цемента входит известняк в количестве до 20 %, его использование позволяет улучшить реологические свойства бетонной смеси, повысить ее связность и однородность, что ведет к повышению прочностных показателей. Характеристики данного цемента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики портландцемента Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5

Наименование	Значение
Тип цемента	Портландцемент с известняком в количестве до 20 %
Класс прочности	42,5 быстротвердеющий
Обозначение	ЦЕМ II/A-И 42,5Б ГОСТ 31108-2016
R _{сж} , 2 суток	26,1 МПа
R _{изг} , 2 суток	4,6 МПа
R _{сж} , 28 суток	48,7 МПа
R _{изг} , 28 суток	7,3 МПа
Равномерности изменения объема	0,9 мм

Химический состав цемента приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав портландцемента Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5

Наименование	Значение
SiO ₂	17
Al ₂ O ₃	4,2
CaO	62,5
Fe ₂ O ₃	2,9
MgO	1,2

Продолжение таблицы 2

Наименование	Значение
TiO ₂	0,3
P ₂ O ₅	0,1
SO ₃	2,9
Na ₂ O	0,1
K ₂ O	0,6
Na ₂ O (экв)	0,6
П.П.П.	8,1
Cl	0,02

Минералогический состав клинкера (%): C₃S – 75, C₂S – 7,6, C₃A – 3,5, C₄AF – 11,6.

где C₃S – трехкальциевый силикат (алит) $3CaO \cdot SiO_2$;

C₂S – двухкальциевый силикат (белит) $2CaO \cdot SiO_2$;

C₃A – трехкальциевый алюминит $3CaO \cdot Al_2O_3$;

C₄AF – четырехкальциевый алюмоферрит $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$;

Начало схватывания 178 мин., конец схватывания 238 мин. Удельная поверхность цемента по Блейну 4200 см²/г.

2.2.2 Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя для эксперимента был использован природный Камский песок с насыпной плотностью равной 1650 кг/м³, а также дробленый песок из гранодиоритов. Пески были выбраны в соответствии с требованиями ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Данные по гранулометрическому составу природного Камского песка приведены в таблице 3, дробленого песка из гранодиоритов приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Гранулометрический состав природного Камского песка.

№ сита, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частный остаток, %	9,6	25,2	22,7	9	31,6	0,4	1,5
Полный остаток, %	9,6	34,8	57,5	66,5	98,1	98,5	100

Модуль крупности природного Камского песка равен:

$$M_k = \frac{9,6 + 34,8 + 57,5 + 66,5 + 98,1 + 98,5}{100} = 3,65$$

Таблица 4 – Гранулометрический состав природного дробленого песка из гранодиоритов.

№ сита, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частный остаток, %	1	25,6	25,6	9,6	24,4	3	10,8
Полный остаток, %	1	26,6	52,2	61,8	86,2	89,2	100

Модуль крупности природного дробленого песка из гранодиоритов равен:

$$M_{др} = \frac{1 + 26,6 + 52,2 + 61,8 + 86,2 + 89,2}{100} = 3,17$$

Получив результаты модуля крупности можно сделать вывод, что согласно ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» природный Камский песок относится к группе песков – «Повышенной крупности» полный остаток на сите № 63 соответствует значениям, приведенным в таблице 2 ГОСТ 8736–2014.

Дробленый песок из гранодиоритов относится к группе песков – «Крупных», данный песок также соответствует требованиям ГОСТ 8736–2014.

2.2.3 Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя для изготовления самоуплотняющегося бетона был использован щебень из гранодиоритов Гумбейского месторождения.

Щебень, а также мелкие заполнители представлены на рисунке 23.



Рисунок 23 – Мелкий и крупный заполнители

Щебень фракции 5-10 мм соответствует требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».

Характеристики щебня приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики щебня из гранодиоритов

Наименование	Значение
Марка по дробимости	M1400
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы	13 % (2-ая группа)
Марка по истираемости	И-1
Насыпная плотность	1360 кг/м ³
Морозостойкость	F300

Химический состав крупного заполнителя из гранодиоритов представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Химический состав крупного заполнителя

Наименование	Значение
SiO ₂	61
Al ₂ O ₃	5,9
CaO	17,2
Fe ₂ O ₃	9,1
MgO	3,4
Na ₂ O	0,65
K ₂ O	0,3

Лещадность составила 13 %, что менее максимального значения в 20 % для самоуплотняющихся бетонов, следовательно, щебень подходит для его применения в самоуплотняющемся бетоне.

2.2.4 Комплексная добавка

В качестве добавок использовались минеральные добавки (микронаполнители) и пластификатор.

В качестве микронаполнителей были выбраны метакаолин, микрокремнезем и зола-уноса. Микронаполнители представлены на рисунке 24.



Рисунок 24 – Микронаполнители

Метакаолин (МТК) – это продукт дегидратации каолиновой глины, является высокоактивной пуццолановой добавкой.

Был использован метакаолин ВМК 45 производства ООО «СИНЕРГО», обладающий наибольшей пуццолановой активностью с максимальной аморфизацией структуры алюмосиликата, порядка 97-99 % среди продуктов данной компании. Данный продукт обладает высокой белизной, удельной поверхностью не менее 16000 см²/г, также отличается высокой активностью по поглощению гидратной извести.

Использовать данную добавку следует вместе с пластификатором, такой комплекс используется для создания самоуплотняющихся, мелкозернистых и тяжелых бетонов. Микроструктура частиц высокоактивного метакаолина представлена на рисунке 25.

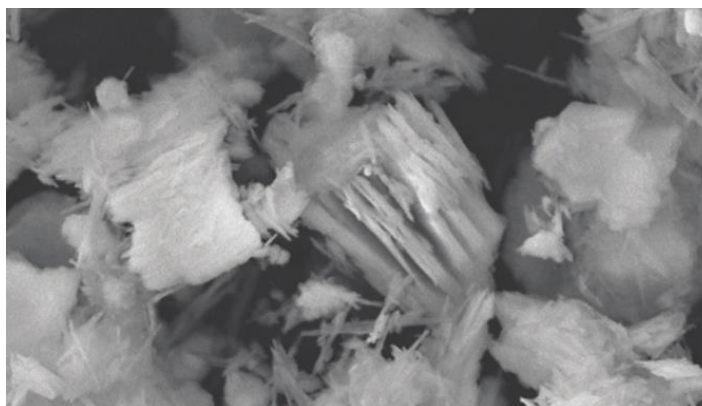


Рисунок 25 – Структура высокоактивного метакаолина

Химический состав МТК приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Химический состав ВМК45

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

Применение высокоактивного метакаолина ведет к модификации структуры цементного камня во время твердения бетонной смеси. Бетонная смесь уплотняется, такой эффект вызван тем, что размер зерен МТК меньше

размера зерен вяжущего. В результате получают плотные новообразования, которые не растворяются водой.

Микрокремнезем (МК) – это пылевидный отход, образующийся в результате производства различных кремниевых сплавов, характеризующийся высоким содержанием SiO_2 .

В работе использован микрокремнезем МК 85, ТУ (МК), являющийся отходом производства Ферросилиций г. Челябинск.

Средний размер частиц МК – 0,1-0,2 мкм, что примерно в 100 раз меньше размера частиц портландцемента, используемого в работе, удельная поверхность – 180000 $см^2/г$.

Внешний вид у частиц МК – гладкая сфера, представлен на рисунке 26, основной компонент данного отхода – диоксид кремния в аморфной форме.

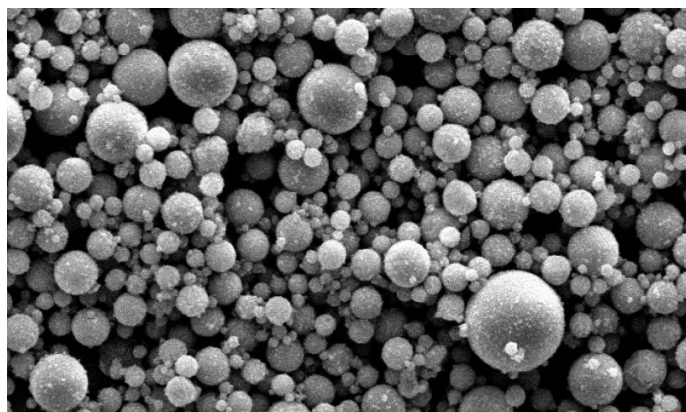


Рисунок 26 – Структура микрокремнезема

Химический состав МК представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Химический состав МК 85

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	C	S
%	90-92	0,68	0,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

Применение микрокремнезема (МК) позволяет достичь снижения расхода цемента до 200-400 кг/м³, повышает коррозионную стойкость и снижает водопроницаемость на 50 %.

В качестве золы-уноса была использована термоактивированная зола-уноса бурых углей. Средний размер зерен 80 микрон, истинная плотность золы-уноса 2,27 г/см³, удельная поверхность золы-уноса 6000 см²/г, содержание активного кремнезема 47 %.

Микроструктура золы-уноса представлена на рисунке 27.

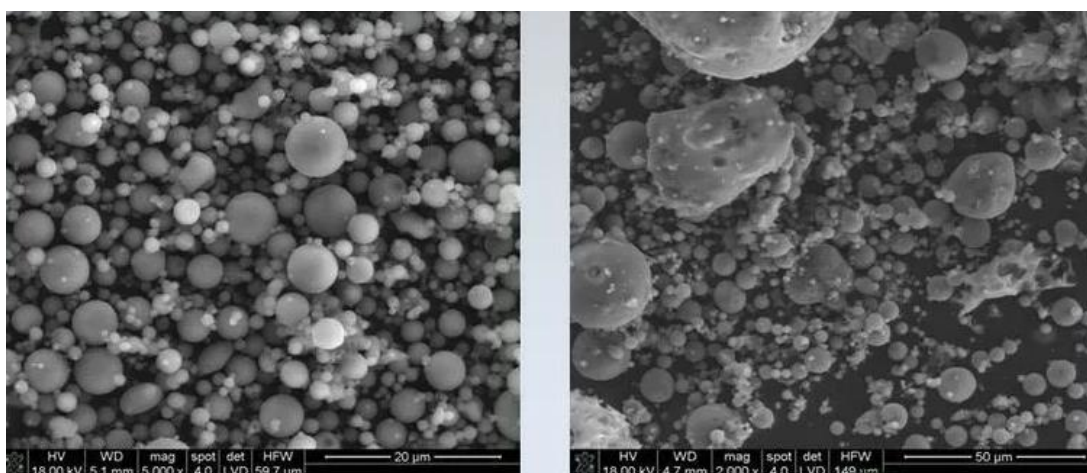


Рисунок 27 – Структура золы-уноса

Использование золы-уноса в количестве 15-20 % от цемента позволяет повысить прочность цементного камня, коррозионную стойкость бетона и их водонепроницаемость.

В качестве пластифицирующих добавок применялись Stachement 2481, Stachement 2280, Полипласт СП-4. В качестве гидрофобизирующей добавки Cemmix CemAqua.

«Добавка Stachement 2481 является продуктом чешско-российского предприятия ЗАО «Стахема-Волга» г. Тольятти, по данным фирмы добавка имеет поликарбоксилатную основу и эффективна для производства бетонов не только для получения высокой прочности, но и водонепроницаемости и долговечности. Оптимальная дозировка добавки Stachement 2481

установленная производителем находится в интервале от 0,15 до 1,4% от массы цемента. Отличается универсальностью и придает высокую раннюю прочность цементному бетону. Эти свойства характерны бетонам с использованием широкого спектра поликарбоксилатов» [30].

Плотность при 20 °С – $1,055 \pm 0,030$ г/мл. РН = 7-10.

«Stachement 2280 предназначен для производства качественных конструкционных бетонов. Внешний вид: красно-коричневая жидкость. Продукт не горюч и физиологически безвредный. Плотность при 20 °С – $1,065 \pm 0,030$ г/мл. РН = 7-10.

Положительные качества: экономит цемент, снижает себестоимость бетона, повышает раннюю и финальную прочность, водонепроницаемость и долговечность бетона, повышает оборачиваемость опалубки, увеличивает стойкость бетона против климатического и химического воздействия, уменьшает количество воды затворения, экономит энергию при обработке бетонной смеси» [37].

Полипласт СП-4 – суперпластификатор, смесь сополимеров на основе нафталинсульфокислоты. Используется для товарного бетона, также может быть использован при изготовлении монолитных и сборных изделий и конструкций, при строительстве в различных направлениях.

Применение Полипласт СП-4 позволяет увеличить подвижность бетонной смеси с П1 до П5 во все сроки твердения, снизить количество расходуемых воды и цемента, повысить прочность более чем на 20 % в равноподвижных смесях, увеличить оборачиваемость форм.

Данный суперпластификатор не имеет в своем составе хлоридов и может применяться при изготовлении армируемых конструкций.

Поставляется в виде порошка и водного раствора, имеет дозировку в качестве пластифицирующей добавки 0,5-1 % по сухому веществу.

Плотность при 20 °С – $1,17$ г/см³. РН = 8 ± 1 .

Сетmix СетAqua – кремнийорганическая гидрофобизирующая добавка, предназначенная для придания водоотталкивающих, морозостойких

свойств, защиты от загрязнения. Действие добавки основано на комплексе полимером, обеспечивающих объемную гидрофобизацию. SemAqua снижает водопоглощение, препятствует появлению высолов и плесени, устраняет увлажнения поверхности бетона, вследствие чего снижается теплопроводность, увеличивается коррозионная стойкость. Плотность при 20 °С – 1,04 г/см³. РН = 9-10.

Выводы по второй главе:

– Определены и описаны методы экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории ЦАКРиОС.

– Определены и изучены свойства материалов, используемых в экспериментальных исследованиях, портландцемента с добавкой известняка, песков Камского и дробленого из гранодиоритов, щебня с Гумбейского карьера, микронаполнителей и пластификаторов.

3 Самоуплотняющийся бетон с комплексной добавкой

3.1 Применение самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой

В соответствии с ГОСТ 59714–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» самоуплотняющиеся бетоны следует применять в следующих случаях:

- если форма конструкции или ее армирование затрудняют укладку и вибрирование обычной бетонной смеси;
- для повышения производительности и снижения трудозатрат;
- для снижения шумовых и вибрационных нагрузок на окружающую среду;

«Возведение монолитных и производство сборных железобетонных конструкций и изделий с использованием самоуплотняющихся бетонных смесей должно осуществляться по технологическому регламенту или технологической карте, утвержденным в установленном порядке производителем бетонных работ, в которых должны быть указаны:

- показатели качества самоуплотняющейся бетонной смеси с учетом конфигурации и характера армирования конструкции (изделия);
- условия и скорость укладки самоуплотняющейся бетонной смеси в опалубку (форму);
- температурно-влажностные параметры и сроки выдерживания монолитных конструкций в опалубке;
- режим тепловлажностной обработки сборных изделий;
- кинетика набора прочности бетона в зависимости от температуры его твердения;
- правила ухода за конструкцией (изделием) после распалубки» [16].

Применение самоуплотняющегося бетона также сопряжено с обязательным выполнением следующих правил:

– укладка смеси в конструкцию или на захватке должна осуществлять непрерывно;

– высота сбрасывания бетонной смеси должна быть не более 1,5 м.

Самоуплотняющийся бетон укладывают в опалубку без виброуплотнения, однако если у бетонной смеси марка по удобоукладываемости РК1 (55-65 см), то допускается кратковременное, до 5 секунд, уплотнение смеси, если при этом не наблюдается ее расслоение.

Ежегодно в Самарской области вводится в эксплуатацию до 900 тысяч м² жилья, основная часть застройки – многоэтажные строения. В Самаре строится сразу несколько жилых комплексов – ЖК «Пять звезд», ЖК «Адмирал», ЖК «Волжские огни», ЖК «Рассвет» и прочие, планируется строительство ЖК «Самара СИТИ» на месте бывшего завода ГПЗ-4 где будет располагаться «дом-доминанта» высотой 250 м (83 этажа) и два здания с 53 и 75 этажей, а также еще несколько ЖК на месте расположения бывших заводов (им. Масленникова, Сокол, силикатный завод и пр., рисунок 28).

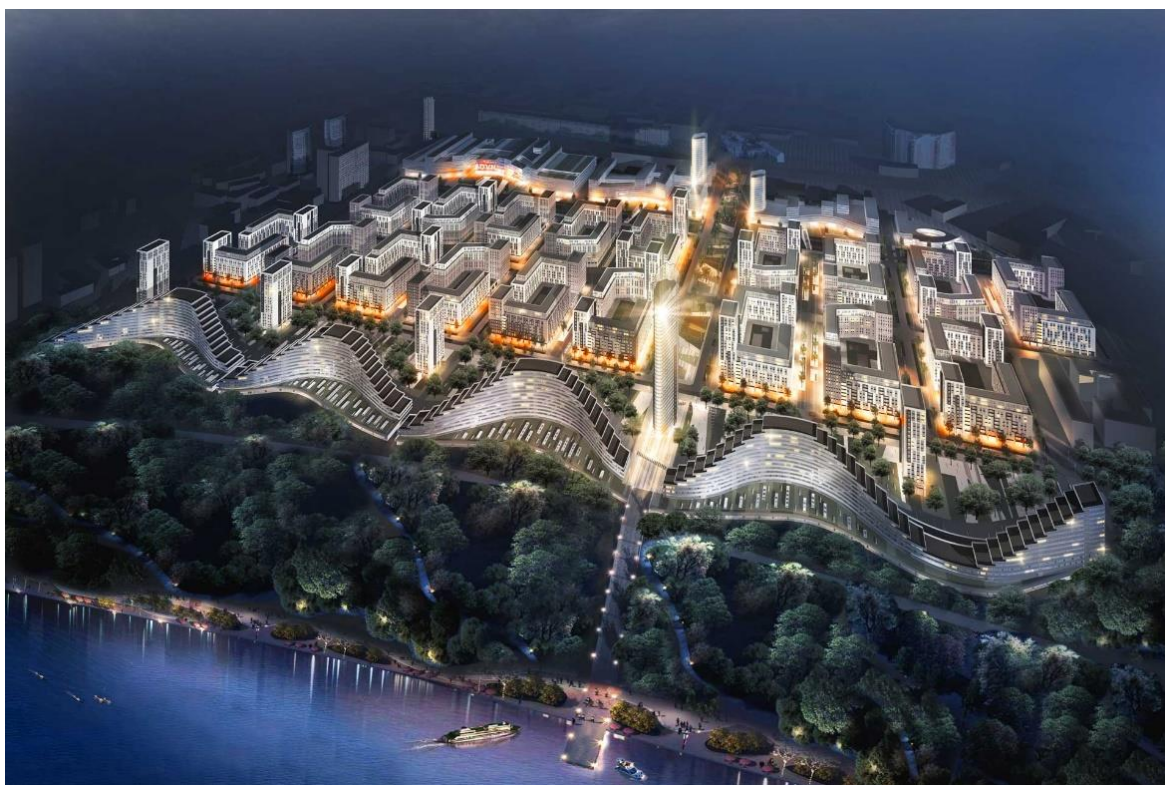


Рисунок 28 – Концепция застройки завода «ЗИМ»

При благоприятном экономическом фоне перспективно строительство аналогичных ЖК за Московским проспектом в городе Тольятти, продолжение строительства ЖК «Арена».

Опыт строительства таких зданий в столице и крупных городах нашей страны, а также в других развитых странах показывает, что при устройстве фундаментных плит для таких строений, зачастую становится безальтернативным применение самоуплотняющегося бетона. Его применение позволяет отказаться от вибрирования бетонной смеси, производить работы в ночное время в жилых кварталах, сократить сроки бетонирования конструкций [32]. Пример густоармированной фундаментной плиты приведен на рисунке 29.



Рисунок 29 – Вид сверху и в разрезе фундаментной плиты

В диссертационной работе ставится задача подобрать состав самоуплотняющегося бетона классов В30-В45 на легкодоступных сырьевых материалах для устройства фундаментных плит при строительстве высотных и массивных зданий на территории нашей области.

3.2 Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона с комплексными добавками

Для исследования физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой был проведен эксперимент, в котором для создания бетонной смеси использовались следующие материалы:

- портландцемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5;
- крупный заполнитель – щебень из гранодиоритов М1400 фракции 5-10 мм;
- мелкий заполнитель – Камский песок и песок дробленый из гранодиоритов;
- минеральный наполнитель – метакаолин ВМК 45, микрокремнезем МК 85, зола-уноса;
- пластификаторы – Полипласт СП-4, Stachement 2481, Stachement 2280;
- гидрофобизирующая добавка – Cemmix CemAqua.

Для определения зависимости прочности бетона от вида заполнителя необходимо изготовить опытные партии образцов на различных видах мелкого заполнителя, микронаполнителей и пластифицирующих добавок.

Выбрав базовый состав компонентов самоуплотняющейся смеси, произвелось три этапа исследования:

- влияние состава мелкого заполнителя на прочность при сжатии самоуплотняющегося бетона;
- влияние состава комплексной добавки на прочность при сжатии и изгибе самоуплотняющегося бетона;
- влияние состава комплексной добавки на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона.

Для решения поставленных задач было изготовлено 17 партий бетонных образцов различного состава (без добавления микронаполнителей, каждый микронаполнитель в сочетании с пластифицирующей добавкой).

Составы бетонных смесей подобранных по методу абсолютных объемов приведены в таблицах 1-3. Были использованы базовые составы без добавок, а также составы с добавлением микронаполнителей:

- 15 % МК от массы цемента;
- 8 % МТК от массы цемента;
- 20 % золы-уноса от массы цемента.

Это оптимальные добавки микронаполнителей, полученные в результате предыдущих исследований, а также на основе анализа реакционной способности (пуццоланической активности) каждой минеральной добавки (рисунок 30).

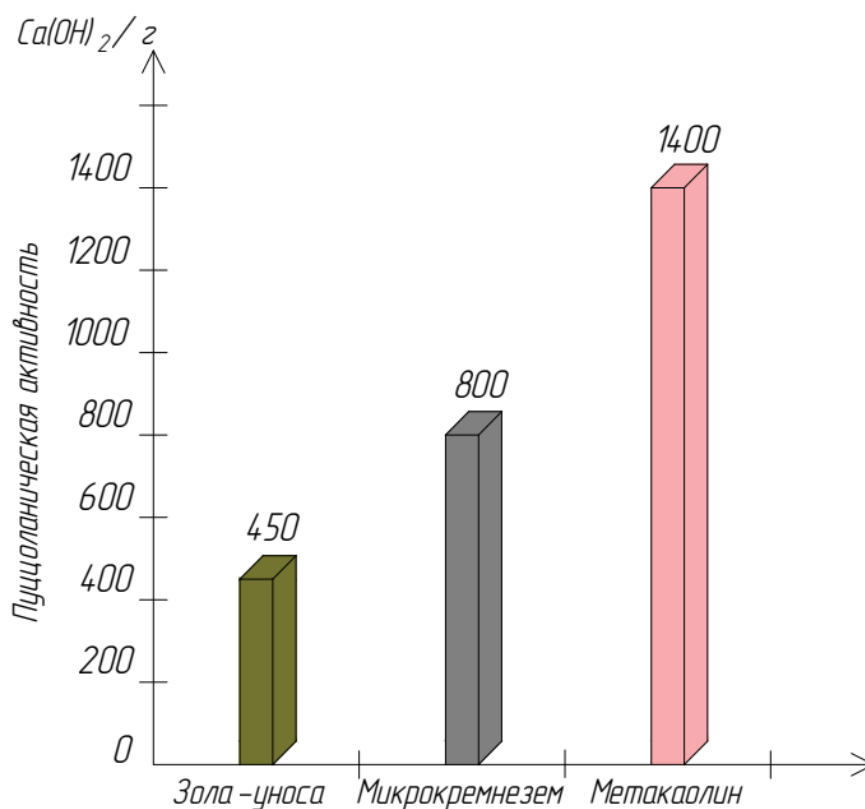


Рисунок 30 – Пуццоланическая активность каждого микронаполнителя

Введение микронаполнителей привело к изменению удельной поверхности вяжущего (рисунок 31) [20].

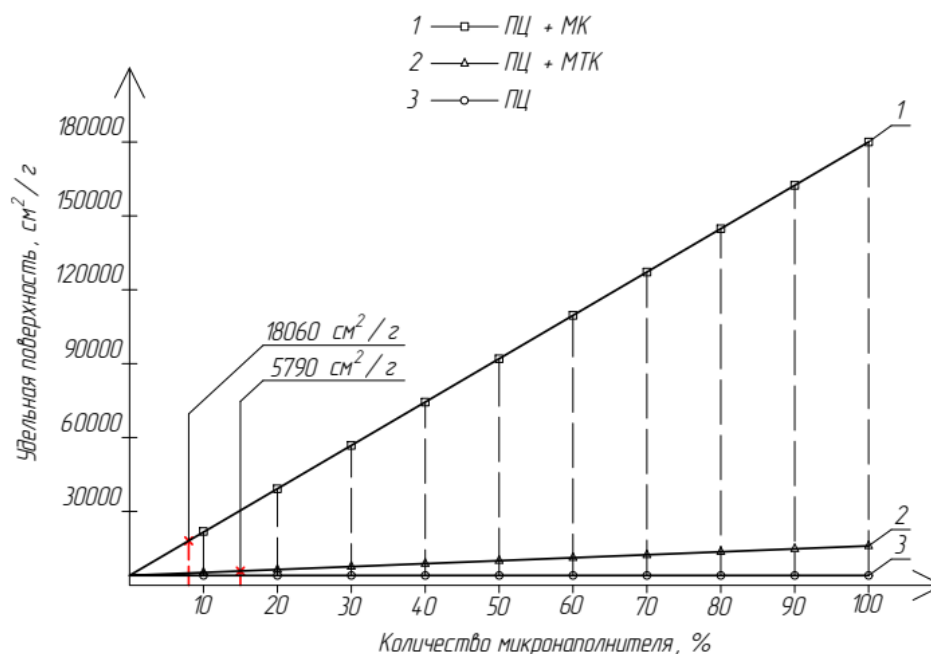


Рисунок 31 – Изменение расчетной удельной поверхности КВ при введении в портландцемент микронаполнителей метакаолина и микрокремнезема

Метакаолин и микрокремнезем, обладающие большей удельной поверхностью чем цемент, привели к повышению удельной поверхности вяжущего, в случае применения метакаолина с 4200 см²/г до 5790 см²/г, микрокремнезема с 4200 см²/г до 18060 см²/г.

Применение золы-уноса приводит к незначительному повышению удельной поверхности с 4200 см²/г до 4560 см²/г (рисунок 32).

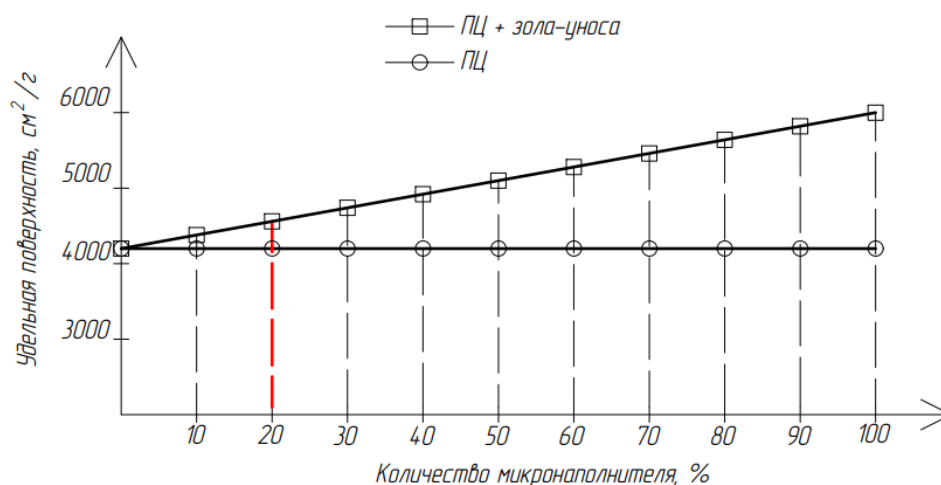


Рисунок 32 – Изменение расчетной удельной поверхности КВ при введении в портландцемент золы-уноса

Для определения прочности на сжатие $R_{сж}$ и прочность при изгибе $R_{изг}$ самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой, а также пористости и водопоглощения использовались формы размером $70 \times 70 \times 70$ мм, $40 \times 40 \times 160$ мм, твердение опытных образцов происходило в нормальных условиях.

Контрольные значения прочности на сжатия фиксировались после 7, 14, 28 суток твердения в нормальных условиях. Прочности при изгибе на 28 сутки. Пористости и водопоглощение спустя 48 часов после помещения образцов во влажную среду.

1 этапом было определено влияние состава мелкого заполнителя на прочность при сжатии самоуплотняющегося бетона.

Для определения влияния состава мелкого заполнителя на прочность при сжатии самоуплотняющегося бетона было изготовлено 3 опытные партии образцов бетона без применения комплексной добавки (рисунок 33).



Рисунок 33 – Опытные бетонные образцы из партий 1, 2, 3

Для исследования влияния мелкого заполнителя на прочность бетонных образцов было приготовлено 3 состава с различным мелким заполнителем:

- партия 1 – 100 % дробленого песка;
- партия 2 – 100 % Камского песка;
- партия 3 – 50 % дробленого песка + 50 % Камского песка.

Составы бетонной смеси приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Состав бетонной смеси партий 1, 2, 3

Состав	Номер партии		
	1	2	3
	Единицы измерения, кг/м ³		
Цемент	574,1	583,2	576,3
Песок дробленый	773,4		388,2
Песок Камский		785,7	388,2
Щебень	734,3	746,0	737,1
Вода	257,5	261,6	258,5
Полипласт СП-4	5,7	6,5	6,4
Средняя плотность	2345	2383	2355
В/В	0,449	0,449	0,449
Распływ	45	59	56

Прочность на сжатие 1, 2, 3 партии бетонных образцов представлена в таблице 10 и на рисунке 34.

Таблица 10 – Предел прочности при сжатии партий 1, 2, 3

Возраст	Предел прочности при сжатии, МПа		
	п. 1	п. 2	п. 3
7 суток	51	37,7	44,5
14 суток	58,1	41,7	52,1
28 суток	72	47,9	57
Набор прочности 7 суток от 28 суток, %	70	78	78

Из рисунка 34 видно, что наибольшую прочность демонстрируют образцы с применением только дробленого песка в своем составе, на 28 сутки прочность составляет 72 МПа. Но использовать только дробленый песок в составе нецелесообразно, увеличиваются трудозатраты и стоимость конечного продукта, уменьшается подвижность и удобоукладываемость бетонной смеси, поэтому для достижения оптимального результата можно использовать смесь дробленого и Камского песков в соотношении 1:1.

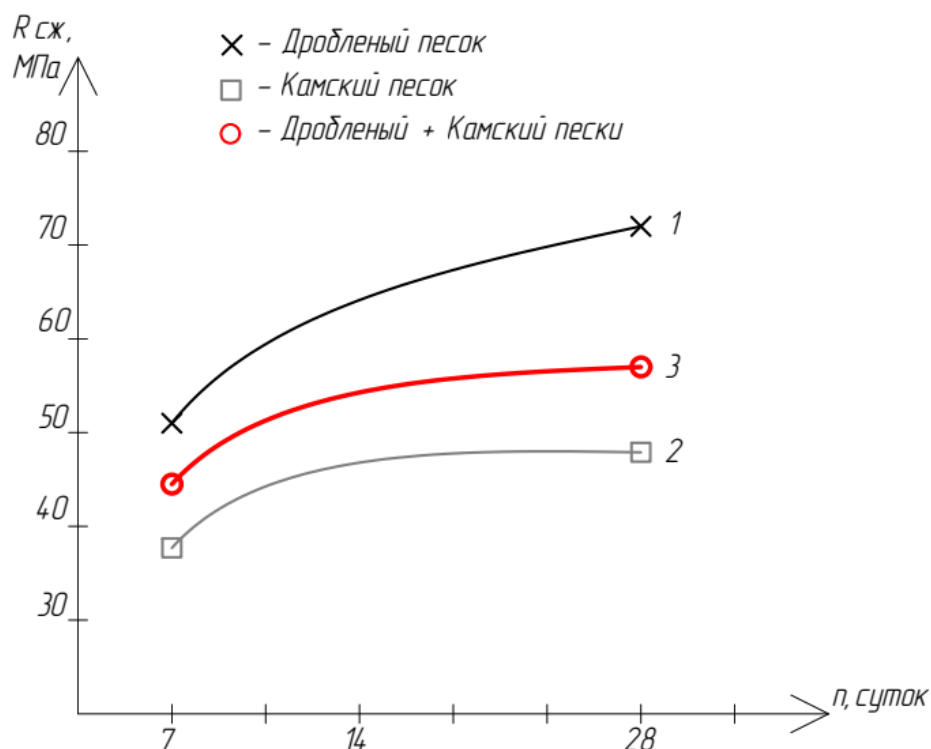


Рисунок 34 – Прочность на сжатие на 7 и 28 сутки твердения в нормальных условиях образцов 1-3 партий

Далее в работе при исследовании влияния комплексной добавки на свойства самоуплотняющегося бетона используется данная смесь песков.

3.2.1 Влияние комплексной добавки на прочность самоуплотняющегося бетона

Метакаолин в качестве микронаполнителя для комплексной добавки.

Для исследования влияния комплексной добавки на основе метакаолина ВМК-45 было приготовлено 4 состава со следующими компонентами комплексной добавки:

- партия 4 – метакаолин + Полипласт СП-4;
- партия 6 – метакаолин + Stachement 2481;
- партия 7 – метакаолин + Stachement 2280;
- партия 16 – метакаолин + Полипласт СП-4 + Cemmix CemAqua.

Приготовление бетонной смеси с применением метакаолина представлено на рисунке 35.



Рисунок 35 – Замес партии 7

Составы бетонной смеси представлены в таблице 11.

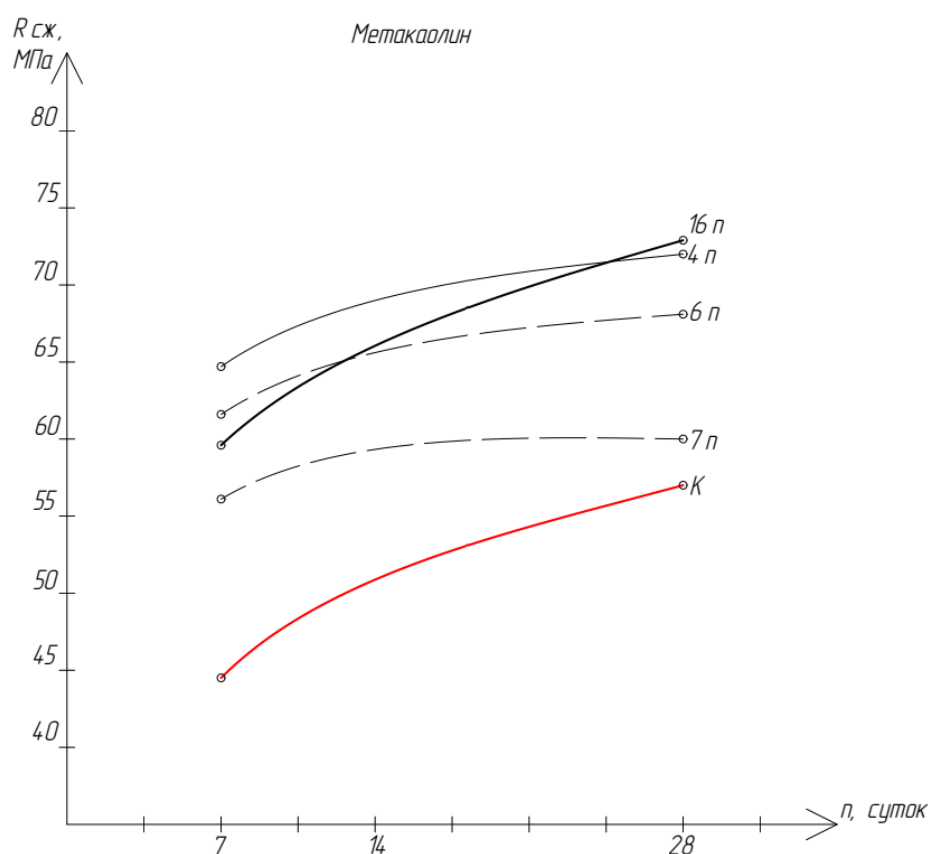
Таблица 11 – Состав бетонной смеси партий 4, 6, 7, 16

Состав	Номер партии			
	4 (СП-4)	6 (2481)	7 (2280)	16 (СП-4 + ГФ)
	Единицы измерения, кг/м ³			
Цемент	556,3	565,1	547,5	569,9
Метакаолин	48,2	49,3	47,6	59,7
Песок дробленый	370,0	357,8	364,1	344,6
Песок Камский	370,0	357,8	364,1	344,6
Щебень	702,1	678,9	690,9	653,9
Вода	271,2	275,6	267,0	334,9
Пластификатор	5,9	6,0	6,4	7,4
Гидрофобизатор	-	-	-	6,8
Средняя плотность	2324	2219	2288	2322
В/В	0,449	0,449	0,449	0,449
Распływ	51	67	70	56

Прочность на сжатие партий бетонных образцов с применением метакаолина представлена в таблице 12 и на рисунке 36.

Таблица 12 – Предел прочности при сжатии партий 4, 6, 7, 16

Возраст	Предел прочности при сжатии, МПа			
	п. 4	п. 6	п. 7	п. 16
7 суток	65,3	61,6	56,1	59,6
14 суток	69,5	65,6	59,3	66
28 суток	72	68,1	60	72,9
Набор прочности 7 суток от 28 суток, %	90,6	90,4	93,5	81



К – смесь песков + Полипласт СП-4, 4 – метакаолин + Полипласт СП-4, 6 – метакаолин + Stachement 2481, 7 – метакаолин + Stachement 2280, 16 – метакаолин + Полипласт СП-4 + CemAqua.

Рисунок 36 – Прочность на сжатие на 7 и 28 сутки твердения в нормальных условиях образцов 4, 6, 7, 16 партий

Применение метакаолина позволяет повысить прочность во все сроки твердения по сравнению с контрольным образцом (партия 3). Образцы с применением ВМК-45 интенсивно набирают прочность в первые 7 суток, на 20-40 % более контрольного образца. На 28 сутки лучшие результаты по

прочности на сжатие показывают образцы с применением в составе комплексной добавки суперпластификатор Полипласт СП-4 и гидрофобизирующей добавки Cemmix CemAqua, при этом, как видно из таблицы 2, лучший расплыв конуса демонстрируют образцы с применением гиперпластификаторов компании Stachement.

Микрокремнезем в качестве микронаполнителя для комплексной добавки.

Для исследования влияния комплексной добавки на основе микрокремнезема МК 85 было приготовлено 4 состава со следующими компонентами комплексной добавки:

- партия 8 – микрокремнезем + Полипласт СП-4;
- партия 10 – микрокремнезем + Stachement 2481;
- партия 11 – микрокремнезем + Stachement 2280;
- партия 17 – микрокремнезем + Полипласт СП-4 + Cemmix CemAqua.

Составы бетонной смеси представлены в таблице 13.

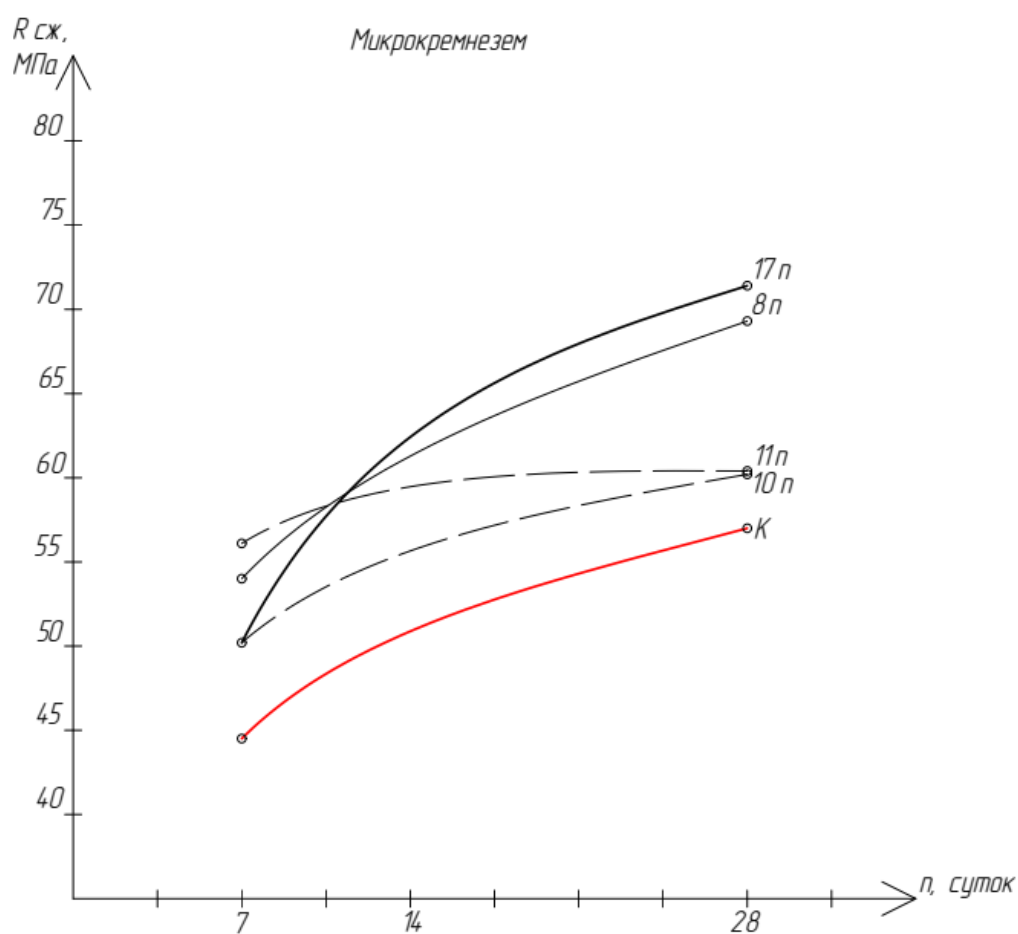
Таблица 13 – Состав бетонной смеси партий 8, 10, 11, 17

Состав	Номер партии			
	8 (СП-4)	10 (2481)	11 (2280)	17 (СП-4 + ГФ)
	Единицы измерения, кг/м ³			
Цемент	537,1	533,8	535,8	535,5
Микрокремнезем	94,9	94,3	94,7	95
Песок дробленый	351,0	348,9	350,2	350,6
Песок Камский	351,0	348,9	350,2	350,6
Щебень	665,0	662,0	664,5	663,1
Вода	283,4	281,7	282,8	281,6
Пластификатор	6,2	5,5	5,6	7,4
Гидрофобизатор	-	-	-	6,8
Средняя плотность	2289	2275	2284	2291
В/В	0,449	0,449	0,449	0,449
Расплыв	49	64	60	53

Прочность на сжатие партий бетонных образцов с применением микрокремнезема представлена в таблице 14 и на рисунке 37.

Таблица 14 – Предел прочности при сжатии партий 8, 10, 11, 17

Возраст	Предел прочности при сжатии, МПа			
	п. 8	п. 10	п. 11	п. 17
7 суток	54	50,2	56,1	50,1
14 суток	62,3	55,7	59,4	60,5
28 суток	69,3	60,2	60,4	71,7
Набор прочности 7 суток от 28 суток, %	77,9	83,3	92,8	70



К – смесь песков + Полипласт СП-4, 8 – микрокремнезем + Полипласт СП-4, 10 – микрокремнезем + Stachement 2481, 11 – микрокремнезем + Stachement 2280, 17 – микрокремнезем + Полипласт СП-4 + CemAqua.

Рисунок 37 – Прочность на сжатие на 7 и 28 сутки твердения в нормальных условиях образцов 8, 10, 11, 17 партий

Приготовление бетонной смеси с применением микрокремнезема представлено на рисунке 38.



Рисунок 38 – Замес партии 10

Микрокремнезем МК 85 в составе комплексной добавки также повышает прочность во все сроки твердения, но образцы с его применением демонстрируют постепенный набор прочности со временем.

Исключением в обоих случаях является гиперпластификатор Stachement 2280, образцы, в которых он применяется демонстрируют прочность на 7 сутки твердения в нормальных условиях – 56,1 МПа, на 28 сутки – 60,4 МПа, то есть образец на 7 сутки набирает порядка 90 % своей проектной прочности, это обуславливается спецификой данной гиперпластификатора, созданного для раннего набора прочности бетона.

Применение микрокремнезема дает незначительно меньшую прочность на 28 сутки, так прочность бетонных образцов партии 8 составляющая 69,3 МПа, на 5 % менее прочности аналогичной партии 4 с применением метаксаолина, прочность образцов которой 72 МПа. Стоит отметить, что образцы с применением МК 85 продолжают набор прочности после 28 суток, в то время как образцы с применением метаксаолина в 28 суток достигают практически предела своей прочности.

Зола-уноса в качестве микронаполнителя для комплексной добавки.

Для исследования влияния комплексной добавки на основе золы–уноса приготовлено 3 состава СУБ. Поскольку зола-уноса приводит к уменьшению водоотделения бетонной смеси было принято решение не использовать гидрофобизирующую добавку Cemmix CemAqua в экспериментах.

Компоненты комплексной добавки:

– партия 12 – зола-уноса + Полипласт СП-4;

– партия 13 – зола-уноса + Stachement 2481;

– партия 14 – зола-уноса + Stachement 2280.

Составы бетонной смеси представлены в таблице 15.

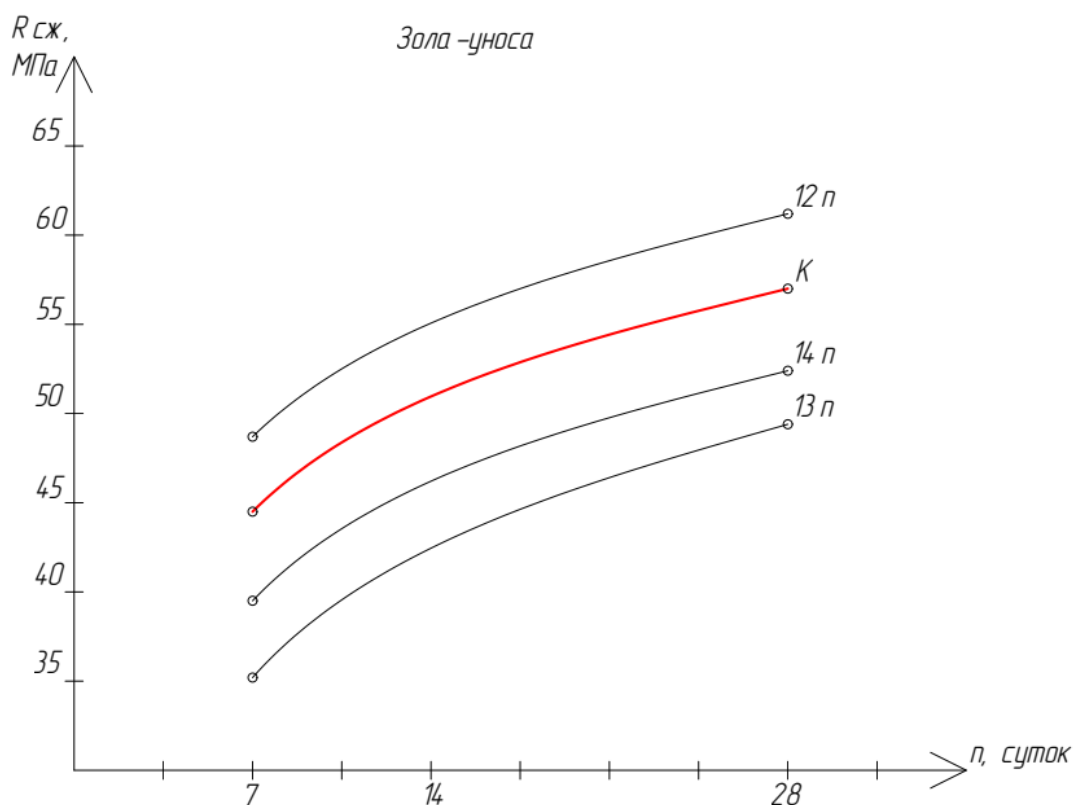
Таблица 15 – Состав бетонной смеси партий 12, 13, 14

Состав	Номер партии		
	12 - Полипласт	13 - 2481	14 - 2280
	Единицы измерения, кг/м ³		
Цемент	516,2	504,1	491,7
Зола	129,2	126,2	123,1
Песок дробленый	358,5	350,1	341,5
Песок Камский	358,5	350,1	341,5
Щебень	680,2	664,2	648,0
Вода	289,4	282,6	275,7
Пластификатор	6,3	5,6	6,0
Средняя плотность	2338	2283	2227
В/В	0,449	0,449	0,449
Распływ	64	71	75

Прочность на сжатие партий бетонных образцов с применением золы-уноса представлена в таблице 16 и на рисунке 39.

Таблица 16 – Предел прочности при сжатии партий 12, 13, 14

Возраст	Предел прочности при сжатии, МПа		
	п. 12	п. 13	п. 14
7 суток	48,7	35,2	43,9
14 суток	56,9	41,9	49,4
28 суток	61,2	49,4	52,4
Набор прочности 7 суток от 28 суток, %	79,5	71	83,7



К – смесь песков + Полипласт СП-4, 12 – зола-уноса + Полипласт СП-4, 13 – зола-уноса + Stachement 2481, 14 – зола-уноса + Stachement 2280.

Рисунок 39 – Прочность на сжатие на 7 и 28 сутки твердения в нормальных условиях образцов 12, 13, 14 партий

Комплексная добавка с микронаполнителем в виде золы-уноса представляет собой один из самых интересных вариантов модификации бетонной смеси. Применение золы-уноса в оптимальной дозировке позволяет экономить больше цемента в сравнении с метакаолином и микрокремнеземом, однако происходит существенное падение прочности на сжатие, при этом, образцы с использованием гиперпластификаторов Stachement имеют прочность меньшую, чем у контрольного образца.

Однако, зола-уноса значительно улучшает удобоукладываемость бетонной смеси, данный показатель является одной из главных характеристик самоуплотняющегося бетона.

Приготовление бетонной смеси с применением золы-уноса представлено на рисунке 40.



Рисунок 40 – Замес партии 12

На рисунке 41 изображены испытанные бетонные образцы.

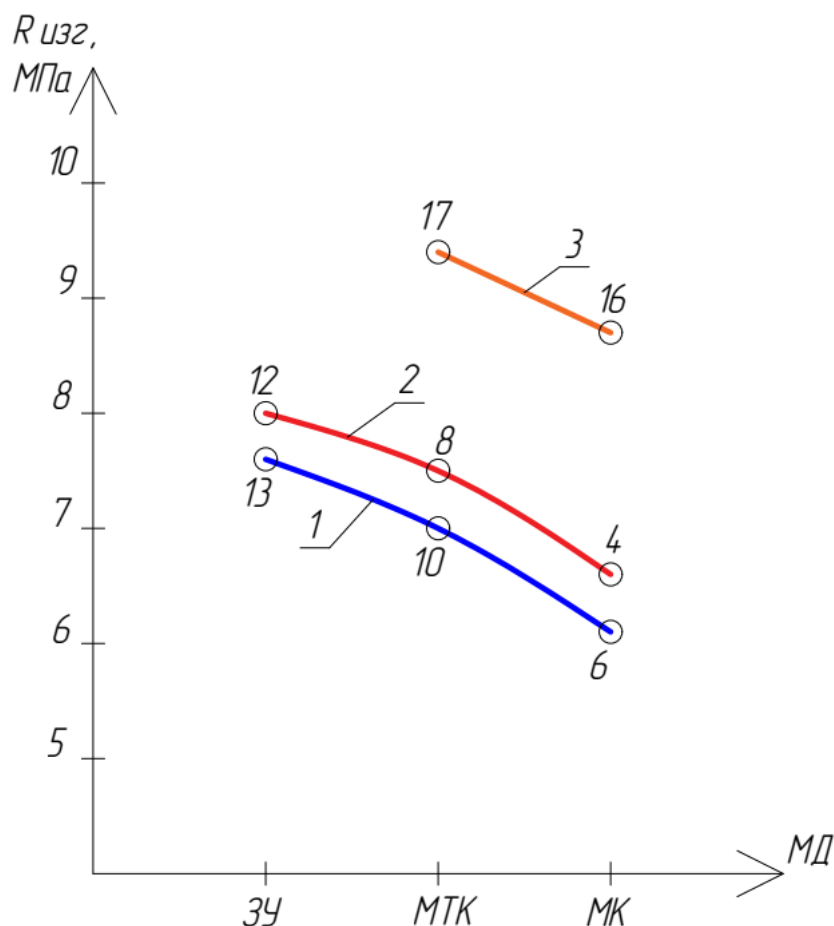


Рисунок 41 – Образцы кубов и балочек

Для исследования влияния комплексной добавки на прочность при изгибе было испытано 8 партий бетонных образцов, которые показали наилучшие результаты по прочности на сжатие. Данные приведены в таблице 17 и на рисунке 42.

Таблица 17 – Прочность бетонных образцов при изгибе

№ партии	4	6	8	10	12	13	16	17
Прочность при изгибе в 28 сут, МПа	6,6	6,1	7,5	7,0	8,0	7,6	8,7	9,4



1 – Stachement 2481, 2 – Полипласт СП-4, 3 – Полипласт СП-4 + ГФ.

Рисунок 42 – Прочность при изгибе на 28 сутки

Лучшие результаты показали образцы партий 16 и 17 в которых использовалась гидрофобизирующая добавка Семтix СемАqua. Наименьшую прочность показали образцы с применением метакаолина.

Также стоит отметить влияние пластификатора на прочность при изгибе, образцы с применением суперпластификатора Полипласт СП-4 показали меньшую прочность по сравнению с образцами с применением гиперпластификатора Stachement 2481.

Принято, что прочность при изгибе составляет примерно 10-15 % от прочности при сжатии. Образцы представленных выше партий удовлетворяют такому условию.

3.2.2 Влияние комплексной добавки на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона

Для определения пористости и водопоглощения были отобраны образцы из партий, представленных в п. 3.2.1.

Данные характеристики являются одними из определяющих при проектировании состава бетонной смеси. Большая пористость, а в следствие и водопоглощение приведут к снижению прочности бетонной смеси и ее расслаиваемости. Данные представлены в таблице 18 и на рисунках 43-44.

Таблица 18 – Пористость и водопоглощение бетонных образцов

№	Состав	Водопоглощение, %	Плотность, г/см ³		Пористость, %
			средняя	истинная	
Метакаолин					
4	МТК + Полипласт СП-4	2,30	2,32	2,60	10,4
6	МТК + Stachement 2481	2,39	2,29	2,58	10,8
16	МТК + Полипласт СП-4 + Cemmix CemAqua	2,29	2,33	2,61	10
Микрокремнезем					
8	МК + Полипласт СП-4	2,34	2,29	2,55	10,5
10	МК + Stachement 2481	2,41	2,28	2,56	11,3
17	МК + Полипласт СП-4 + Cemmix CemAqua	2,27	2,34	2,59	10,2
Зола-уноса					
12	ЗУ + Полипласт СП-4	2,27	2,34	2,6	10
13	ЗУ + Stachement 2481	2,24	2,28	2,58	10,1

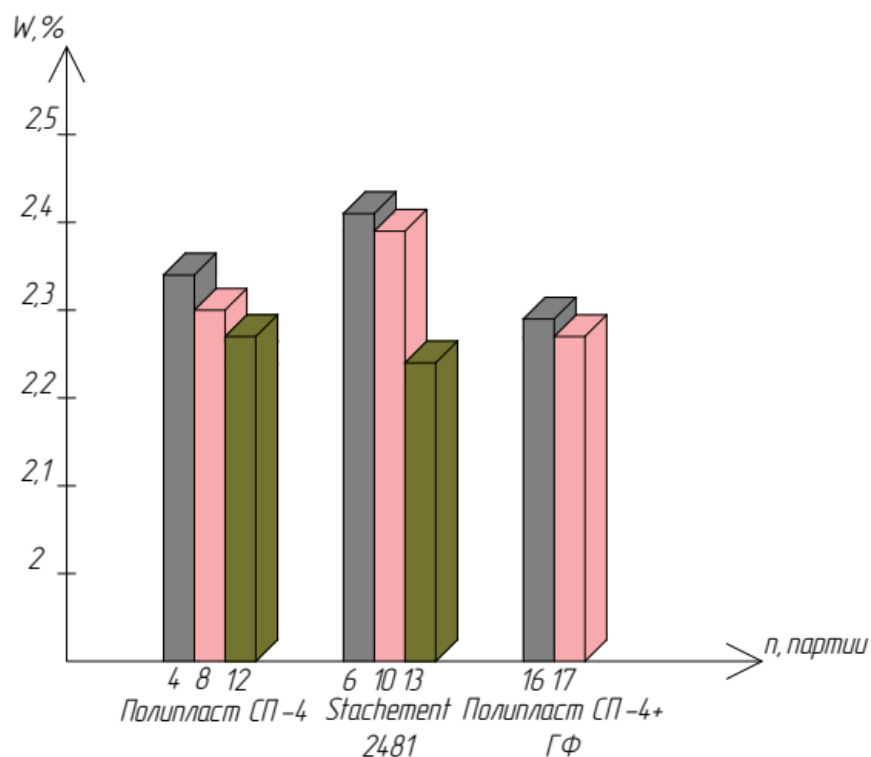


Рисунок 43 – Водопоглощение бетонных образцов

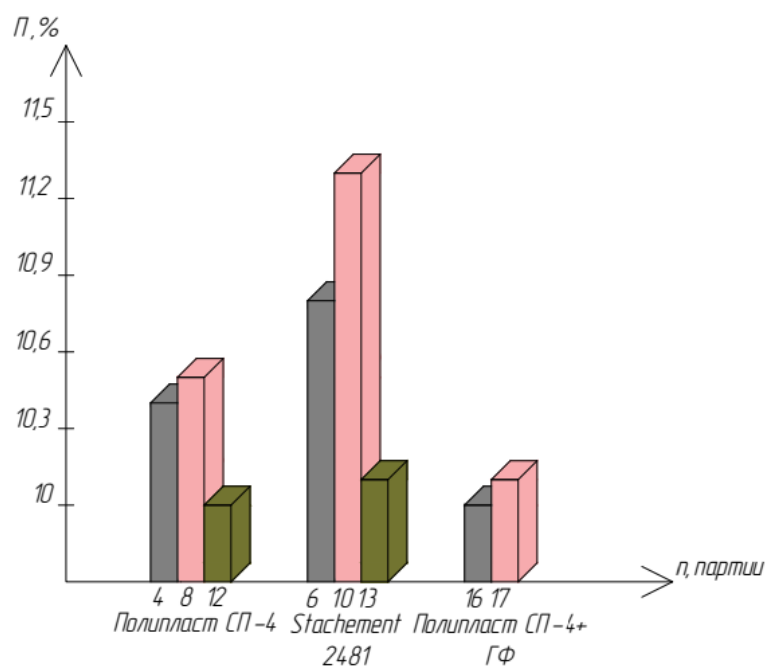


Рисунок 44 – Пористость бетонных образцов

Пористость всех бетонных образцов находится в диапазоне 10-11,5 %, относительно остальных образцов большей пористостью обладают партии 6 и 10 с применением гиперпластификатора Stachement 2481 из-за большего водопоглощения бетонной смеси. Наименьшую пористость

продемонстрировали образцы с применением золы-уноса, а также образцы с применением гидрофобизирующей добавки.

3.3 Разработка оптимального состава и экономическое обоснование использования самоуплотняющегося бетона в монолитных конструкциях

В результате проведенных экспериментов были определены зависимости прочности от состава бетонной смеси.

Исходя из полученных данных предложен следующий состав самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой, обеспечивающий необходимые характеристики бетонной смеси для ее использования при монолитном строительстве в нашей области:

- портландцемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5;
- 50 % дробленого песка из гранодиоритов + 50 % Камского песка;
- щебень фракции 5-10 мм;
- 10 % микрокремнезема взамен портландцемента;
- 10 % золы-уноса взамен портландцемента;
- суперпластификатор Полипласт СП-4.

В составе бетонной смеси используется 10 % микрокремнезема – это позволяет уплотнить структуру цементного камня и повысить прочность бетона, также такое количество МК позволяет избежать «перенапряжения» бетона во избежание образования трещин.

Добавление 10 % золы-уноса позволяет увеличить подвижность бетонной смеси. Применение микрокремнезема и золы-уноса позволяет запустить реакцию взаимодействия алюмосиликатов и силикатов с гидроксидом кальция в цементе, в результате чего образуются низкоосновные гидросиликаты кальция $CSH(1)$ и получается бетон высокой прочности.

В качестве пластификатора использован Полипласт СП-4, в паре с золой-уноса он позволяет получить самоуплотняющуюся смесь, при этом снижается цена (в сравнении с применением гиперпластификатора на поликарбоксилатной основе).

Данная смесь обладает маркой по удобоукладываемости РК1/РК2 – расплыв конуса составляет 65 см. Класс – В40. Подробно свойства представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Свойства оптимального состава

№	Состав	$R_{сж}^{2сут}$, МПа	$R_{сж}^{7сут}$, МПа	$R_{сж}^{28сут}$, МПа	$R_{изг}^{28сут}$, МПа	Wm, %	$\rho_{ср}$, г/см ³	$\rho_{ист}$, г/см ³	П, %
18	МК+ЗУ+СП-4	30,6	51	63,7	7,8	2,3	2,34	2,59	10,2

График набора прочности самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой представлен на рисунке 45.

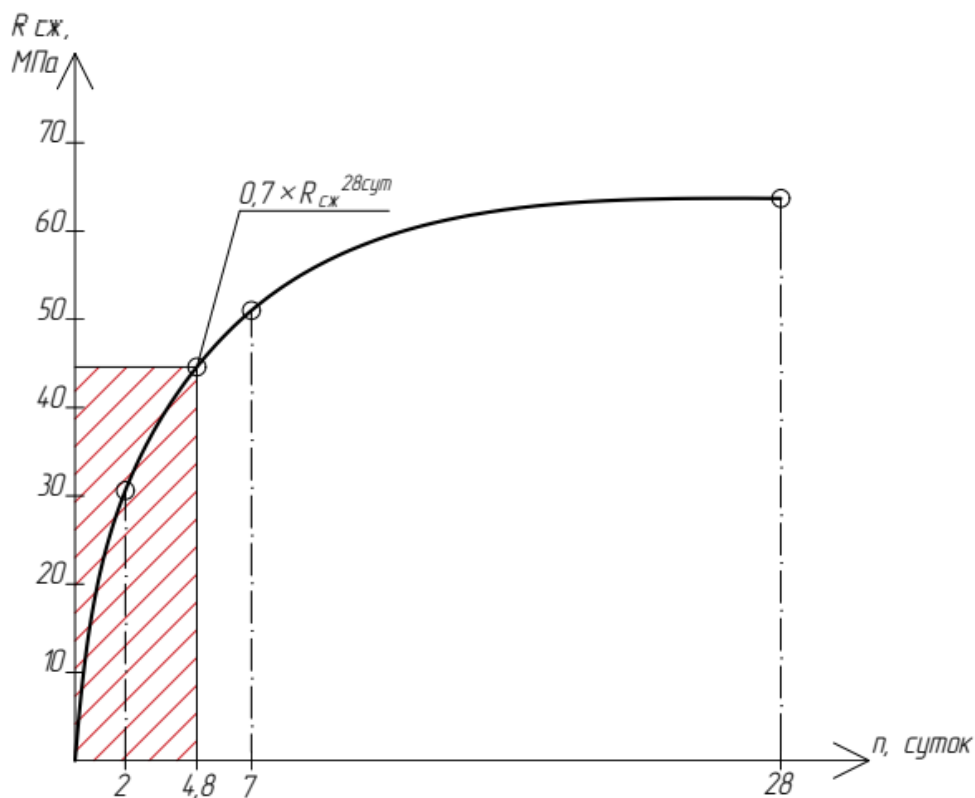


Рисунок 45 – Динамика набора прочности бетонных образцов 18 партии

Приготовление данной бетонной смеси представлено на рисунке 46.



Рисунок 46 – Замес партии 18

Стоимость 1 м³ данной смеси приведена в таблице 20.

Таблица 20 – Стоимость самоуплотняющегося бетона

Наименование материала	Расход на 1 м ³ , т	Стоимость, руб	Стоимость 1 м ³ , руб
Портландцемент Holcim M500 ЦЕМ П/А-И 42.5	0,515	8000	4120
Дробленный песок	0,358	1000	358
Камский песок	0,358	750	268
Щебень 5-10	0,680	1000	680
Вода	0,290	25	7
Микрокремнезем	0,065	12000	780
Зола-уноса	0,065	600	39
Полипласт СП-4	0,01	30000	300
Стоимость 1 м ³ самоуплотняющегося бетона В40			6550
Стоимость 1 м ³ бетона В35 «Бетонград»			5800

В городе Тольятти компания «Бетонград» предлагает к покупке бетон класса В35 по цене 5800 рублей за 1 м³, классов В40 и выше в ассортименте нет. Как видно из полученных данных, полученная стоимость бетона оказалась на 11 % больше предлагаемой заводом, однако в таком случае мы получаем не самоуплотняющуюся смесь и потребуются дополнительные затраты на ее вибрирование.

При учете развитой сырьевой базы и логистики, стоимость самоуплотняющегося бетона будет незначительно выше стоимости обычного бетона такой же прочности, однако применение бетонов нового поколения позволит значительно сократить сроки строительства.

Выводы по третьей главе:

– Проведены исследования влияния состава мелкого заполнителя на свойства самоуплотняющегося бетона, подобрано оптимальное количество минеральной добавки и представлено ее влияние на изменение удельной поверхности вяжущего.

– Проведены исследования влияния различных сочетаний минерального наполнителя и пластификатора на свойства самоуплотняющегося бетона.

– На основании полученных результатов определен оптимальный состав самоуплотняющегося бетона, исследованы его свойства – получен класс В40, определена стоимость 1 м³.

Заключение

На основании результатов экспериментальных исследований, приведенных в магистерской диссертации следует ряд выводов:

– Обоснована возможность получения самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой на легкодоступных заполнителях и портландцементе с применением метакаолина, микрокремнезема и золы-уноса, способствующих повышению степени гидратации вяжущего, увеличение цементного геля и снижению пористости.

– Установлено влияние мелкого заполнителя на прочность и подвижность самоуплотняющейся бетонной смеси, применение смеси дробленого песка из гранодиоритов и Камского песка в соотношении 50:50 позволяют получить самоуплотняющийся бетон с $R_{сж} = 47,9$ МПа и РК = 59 см.

– Установлено влияние комплексной добавки на свойства самоуплотняющегося бетона.

Применение метакаолина взамен 8 % портландцемента позволяет получить наибольшую прочность на 28 сутки твердения в нормальных условиях ($R_{сж} = 72$ МПа). Также образцы с применением метакаолина набирает на 7 сутки порядка 90 % от проектной прочности, однако из-за своей структуры метакаолин тяжело равномерно распределить в смеси, также повышенная водопотребность требует обязательного добавления гиперпластификатора для получения самоуплотняющейся бетонной смеси.

Образцы с применением микрокремнезема взамен 15 % портландцемента обладают более однородной структурой, набор прочности у них происходит равномерно, но микрокремнезем также требует применения вместе с ним гиперпластификатора, чтобы получить самоуплотняющийся бетон.

Применение золы-уноса взамен 20 % портландцемента ведет к снижению прочности относительно образцов с применением метакаолина и

микрокремнезема. Однако за счет своей структуры, зола-уноса позволяет получить более подвижную смесь, относительно образцов с применением метакаолина или микрокремнезема.

– Установлена эффективность пластификаторов.

Наибольшую прочность при РК более 60 см показывают образцы с применением гиперпластификатора Stachement 2481. Применение гиперпластификатора Stachement 2280 позволяет получить более подвижную смесь, также данные образцы быстрее всего набирают прочность (более 90 % проектной прочности уже на 7 сутки твердения). Применение суперпластификатора Полипласт СП-4 позволяет получить образцы с наибольшей прочностью, но меньшей подвижностью.

– В результате исследования предложен оптимальный состав самоуплотняющейся бетонной смеси с легкодоступными заполнителями для использования ее на территории Самарской области. Бетон класса В40 с РК = 65 см, в состав которого входят микрокремнезем взамен 10 % портландцемента и зола-уноса взамен 10 % портландцемента, а также отечественный суперпластификатор Полипласт СП-4. Полученная смесь обладает хорошей удобоукладываемостью, плотной структурой, минимальным количеством пустот, чистой поверхностью, не требующей обработки.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Ахметов, Д. А. Опыт применения самоуплотняющихся бетонов в строительной индустрии Республики Казахстан / Д. А. Ахметов, Е. Н. Роот. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 48 (182). — С. 11-14. -URL: <https://moluch.ru/archive/182/46775/>

2. Балыков А.С. Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетона и фибробетоны на основе высоконаполненных модифицированных цементных вяжущих: диссертация к.т.н. / А.С. Балыков – С.: РГБ ОД, 2018. – 228 с.

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

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. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А.В.Батудаева, Г.С.Кардумян, С.С.Каприелов // II Всероссийская Международная конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития», 5-9 сентября 2005. Москва, том 3, с.24-31

6. Высокопрочные бетоны в конструкции фундаментов высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» / Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №3. С. 53-57

7. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости. Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартиформ. 2018. - 33с.

8. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ. 2018. - 35с.

9. ГОСТ Р 57345-2016/EN 206-1:2013 Бетон. Общие технические условия. Введ. 2017-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 80 с.
10. ГОСТ 25818-2017 Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. Введ. 2016-01-03. – М.: Стандартинформ, 2019. - 24с.
11. ГОСТ Р 595362-2021 Метакаолин для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Введ. 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2019. - 24с.
12. ГОСТ Р 58894-2020 Микрокремнезем конденсированный для бетонов и растворов. Технические условия. Введ. 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. - 16с.
13. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. Введ. 1989-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 25с.
14. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия (с поправкой). Введ. 2015-04-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7с.
15. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. Введ. 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28с.
16. ГОСТ Р 59714-2021 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартинформ, 2021. - 16с.
17. ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия. Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 41с.
18. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15с.
19. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введ. 1995-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14с.
20. Дятлов А.К. Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон с комплексной наносодержащей добавкой: диссертация к.т.н. / А.К. Дятлов. – М.: РГБ ОД, 2013. – 182 с.

21. Егорова Е.В. Самоуплотняющийся бетон с полифункциональным модификатором на основе отходов промышленности: диссертация к.т.н. / Е.В. Егорова. – М.: РГБ ОД, 2016. – 161 с.

22. Зола-уноса [Электронный ресурс] // Использование золы-уноса ТЭС в качестве добавки при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций: [сайт]. [2022]. URL: <http://masterbetonov.ru/content/view/16111/290/>

23. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Исследование самоуплотняющегося бетона для производства железобетонных изделий на универсальном стенде с переставной опалубкой // ИВД. 2018. №3 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-samouplotnyayuschegosya-betona-na-universalnom-stende-s-perestavnoy-opalubkoy>

24. Мастер Бетон [Электронный ресурс] // Предприятие Мастер Бетон: [сайт]. [2022]. URL: <http://www.masterbeton-mb.ru>

25. Метакаолин [Электронный ресурс] // Метакаолин МКЖЛ модификатор структуры цементного камня: [сайт]. [2022]. URL: <http://kaolinzh.ru/prod/metakaolin/>

26. Метакаолин [Электронный ресурс] // Преимущества применения высокоактивного метакаолина в бетонах и сухих строительных смесях: [сайт]. [2022]. URL: mineralproducts.ru

27. Метакаолин [Электронный ресурс] // Рекомендации по использованию ВМК производства ООО «СИНЕРГО»: [сайт]. [2022]. URL: mineralproducts.ru

28. Модифицированные бетоны в практике современного строительства / В.Г.Батраков, С.С.Каприелов, А.В.Шейнфельд, Е.С.Силина // Промышленное и гражданское строительство. № 9. 2002. С.23-25

29. Мозгалев К. М., Головнев С. Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства / Мозгалев К. М., Головнев С. Г. //

Научно-методический журнал «Академический вестник УралНИИПроект РААСН», 2011г.

30. Морозова Н. Н., Майсурадзе Н. В., Клоков В. В. Исследование гидрофобизации гипсовых и композиционно-гипсовых материалов/ Мозгалев Морозова Н. Н., Майсурадзе Н. В., Клоков В. В. // Научно-методический журнал «Вестник технологического университета», 2017г.

31. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий / С.С.Каприелов, А.В.Шейнфельд, Г.С.Кардумян, Ю.А.Киселева, О.В.Пригоженко. // Высотные здания, № 5, октябрь-ноябрь 2007 г., с. 94-101.

32. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА / Фаликман Вячеслав Рувимович, Денискин Вячеслав Вячеславович, Калашников Олег Олегович, Сорокин Всеволод Юрьевич // НАУ. 2015. №2-3 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otechestvennyy-opyt-proizvodstva-i-primeneniya-samouplotnyayuschegosya-betona>

33. Портландцемент [Электронный ресурс] // Портландцемент: [сайт]. [2022]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Портландцемент>

34. Роль добавок в уменьшении клинкерной составляющей при производстве товарных бетонных смесей / Рунова Р.Ф., Руденко И.И., Троян В.В. // М-лы 10-й Межд. научно-практ. конф. «Днисовременногобетона». – Запорожье: «Планета», 2008. – с. 45 – 59.

35. Соловьев Алексей Кириллович, Соловьев Кирилл Алексеевич, Стекольников Николай Владимирович Самоуплотняющийся бетон в архитектурных конструкциях // АМІТ. 2018. №2 (43). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/samouplotnyayuschiy-beton-v-arhitekturnyh-konstruktsiyah>

36. Ушеров-Маршак А.В. Современный бетон и его технологии / А.В. Ушеров-Маршак // Бетон и железобетон. – СПб.: Изд-во «Славутич». 2009. – С. 20-24.

37. STACHEMA [Электронный ресурс] // STACHEMENT 2280: [сайт]. [2021]. URL: <http://www.stachema.ru/products/9/45/>

38. Corinaldesi, V. Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC / V. Corinaldesi, S. Monosi, M.L. Ruello // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 30. – P. 289-293.

39. Siddique, R. Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash / R. Siddique., P. Aggarwal, Y. Aggarwal // Construction and Building Materials. – Vol. 29. – 2012. – P. 73-81.

40. Mehmet, G. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume / G. Mehmet, G. Erhan, O. Erdogan // Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23. – P. 1847-1854.

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 Concrete / H. Okamura, M. Ouchi // J. of Advanced Concrete Technology. – Vol. 1, No1. – 2003. – P. 5-1