

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы (диссертации)

«РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ПРОЧНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ НА ИХ ОСНОВЕ»

Направление подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства»
Научная направленность «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Аспирант



Борисенко Марина Степановна

Допустить к защите научного доклада:

Заведующий кафедрой ПГС



канд. техн. наук, доцент
М.А. Ращупкина

Научный руководитель



канд. техн. наук, доцент
М.А. Ращупкина

Нормоконтроль



канд. техн. наук, доцент
П.П. Дерябин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Повышение качества строительных материалов и конструкций, а также поиск путей сокращения материальных, энергетических и трудовых затрат при их изготовлении является важной и актуальной задачей в современном строительстве. В последнее время в строительной практике при возведении различных объектов все шире применяются бетоны с улучшенными физико-механическими свойствами. А именно бетонные смеси с высокой подвижностью, благодаря которой они могут растекаться под действием собственного веса и заполнять густоармированные конструкции без уплотнения. Тем не менее, такие бетоны обладают и определенными недостатками. Принципиальными из них являются особые требования к подбору состава бетона, повышенный расход цемента, высокая стоимость бетонной смеси. В связи с этим представляются важными исследования, направленные на разработку составов мелкозернистых бетонов по составу близких к самоуплотняющемуся бетону с пониженным расходом цемента, отличающихся высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Проведённый анализ современного состояния технологии бетонных смесей показывает, что такой результат, может быть, достигнут путём комплексного применения минеральных и пластифицирующих добавок, активно влияющих на реологические свойства бетонной смеси, структуру и фазовый состав цементного камня. Также установлено, что однокомпонентные добавки не могут самостоятельно решить поставленную задачу.

Данная работа направлена на снижение расхода портландцемента за счёт введения золы-уноса в бетонную смесь, использование местного речного песка, что особенно актуально, для регионов, где отсутствует качественный крупный заполнитель (гравий, щебень) и повышение предела прочности при сжатии – в проектном возрасте до уровня высокопрочных бетонов.

Использование золы-уноса при приготовлении мелкозернистых

бетонных смесей помогает сэкономить цемент и улучшить экологию. Зола-унос - это пуццолановый тонкодисперсный порошок, который образуется при сжигании угля. Ежегодно от сжигания угля образуется много золы и шлаков, что приводит к увеличению отходов и вредит экологии. Если добавлять золу-унос в бетон, можно использовать меньше цемента, что помогает экономить деньги и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду.

За счет мелкого заполнителя повышается однородность бетонной смеси. За счет повышения плотности материала достигаются высокие показатели прочности, благодаря сокращению промежуточной зоны между цементным камнем (матрицей) и заполнителем, минимизируется количество пустот и уменьшается водоцементное отношение. К тому же для улучшения качества мелкозернистого бетона необходимо использование добавок для обеспечения подвижности, удобоукладываемости бетонной смеси и понижения количества воды.

Степень научной разработанности темы исследования

Рассмотрению закономерностей и свойств бетона и бетонных смесей с **высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями** бетонов с пластифицирующими и минеральными добавками, в том числе самоуплотняющихся бетонов, посвящены работы многих отечественных и зарубежных учёных и исследователей, в том числе И.Н. Ахвердова, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, А.И. Вовка, Б.В. Гусева, Л.М. Добшица, В.Т. Ерофеева, Ю.Г. Иващенко, В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Л.Я. Крамар, Г.В. Несветаева, А.И. Панченко, В.С. Рамачандрана, П.А. Ребиндера, Н.К. Розенталя, Г.С. Рояка, В.И. Соломатова, О.В. Тараканова, А.В. Ушерова-Маршака, В.Р. Фаликмана, А.Е. Шейкина, А.В. Шейнфельда, и др. Несмотря на большое количество выполненных исследований, и опубликованных работ на эту тему, имеются нерешённые вопросы, которые требуют дальнейших исследований по изучению процессов гидратации цемента и структурообразования цементного камня в присутствии поликарбоксилатных гиперпластификаторов с различной молекулярной структурой, а также

разработка бетонных составов на их основе совместно с активными минеральными добавками для получения мелкозернистых бетонов с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками.

Основная идея работы состоит в том, что рассматривается возможность введения золы-уноса с добавкой эфира поликарбоксилата с рациональным зерновым составом при производстве мелкозернистых бетонов. Во-первых, это является актуальной проблемой в плане решения вопросов экономии цемента и экологии. Во-вторых, позволяет получить подвижные и удобоукладываемые мелкозернистые бетонные смеси с высокими прочностными характеристиками.

Объект исследования – микросфера золы-уноса, гидронамывной речной песок, добавки на основе эфира поликарбоксилата, мелкозернистый бетон.

Предмет исследования – реологические и прочностные свойства мелкозернистого бетона и мелкозернистых бетонных смесей на золе-уноса от сжигания экибастузского угля с добавкой на основе эфира поликарбоксилата.

Цель диссертационного исследования – повышение прочности мелкозернистого бетона и управление его реологическими свойствами достигается с помощью добавки на основе эфира поликарбоксилата и микронаполнителя золы-уноса.

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

- обосновать возможность получения мелкозернистого бетона с высокими прочностными характеристиками, получение подвижных и удобоукладываемых мелкозернистых смесей;

- Провести анализ влияния гидронамывного речного песка с модулем крупности ($M_{кр}$) 1,8 на структуру цементного камня, включая физико-механические характеристики, микроструктурные особенности цементного камня;

- проанализировать влияние микронаполнителя с добавкой на основе эфира поликарбоксилата на структуру и свойства мелкозернистого бетона;

- разработать рекомендации по проектированию состава мелкозернистого бетона с добавкой эфира поликарбоксилата и микронаполнителя – золы-уноса;
- провести опытно-производственную апробацию результатов исследования.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Установлен синергетический эффект от введения в мелкозернистую бетонную смесь на вяжущем из портландцемента, золы-уноса, речного песка и добавки на основе эфира поликарбоксилата.

2. Получен сравнительный анализ влияния микронаполнителя золы-уноса с добавкой на основе эфира поликарбоксилата, на прочностные и реологические характеристики мелкозернистого бетона.

3. Выявлено технологическое решение, получения мелкозернистого бетона с пониженным расходом цемента за счет использования микронаполнителя золы-уноса и добавки на основе эфира поликарбоксилата, с применением местного гидронамывного речного песка. Выявленный синергический эффект при совместном использовании поликарбоксилатного эфира и микронаполнителя золы-уноса, позволяет значительно улучшить структуру мелкозернистого бетона, снизить их капиллярную пористость и повысить реологические и прочностные характеристики, которые невозможно достигнуть при раздельном введении добавок.

4. Установлены закономерности процессов гидратации портландцемента и формирования фазового состава цементного камня в присутствии компонентов микронаполнителя золы-уноса и добавки эфира поликарбоксилата. Выявлено, что применение золы-уноса способствует ускорению процессов гидратации цемента в возрасте 1 суток. В возрасте 28 суток применение микронаполнителя золы-уноса и добавки эфира поликарбоксилата приводит к формированию более плотной и однородной структуры цементного камня с пониженным содержанием портландита на 20 %.

5. Выявлено, что применение золы-уноса стимулирует образование

дополнительных гидросиликатов кальция за счет пуццолановой реакции, при которой активный кремнезем золы связывает свободный гидроксид кальция, выделяющейся при гидратации цемента. Если в цементном камне с микронаполнителем золы-уноса преобладают высокоосновные гидросиликаты кальция $C_2SH=1,6...2,0$, то при использовании с добавкой эфира поликарбоксилата формируются более прочные и устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция $CSH=1,1...1,5$.

6. Выявлено, что в бетонах с добавкой эфира поликарбоксилата происходит формирование более плотной и однородной структуры контактной зоны цементного камня с мелким заполнителем. Введение поликарбоксилатов в цементное тесто вызывает стерическое отталкивание боковых цепей адсорбированных макромолекул цементных зерен. В процессе гидратации цемента возрастает удельная поверхность новообразований в бетонной смеси. Это способствует более эффективному адсорбированию оставшихся молекул добавки, что позволяет сохранять консистенцию на длительное время. Такой механизм приводит раствор в движение, что в свою очередь, способствует к равномерному распределению и уплотнению смеси в формах.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и применении строительными организациями мелкозернистого бетонных смесей на основе местного гидронамавного речного песка с микронаполнителем золы-уноса (для экономии цемента) и добавкой на основе эфира поликарбоксилата для улучшения реологических свойств и повышения прочностных характеристик бетона.

Личный вклад автора состоит в определении целей и задач работы, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении результатов, апробации результатов исследований, подготовке их к публикации.

Методологической основой исследования послужили современные положения теории и практики материаловедения и технологии бетонов; общенаучные методы, базирующиеся на обобщении, сравнении,

эксперименте, методах математического моделирования, планирования и обработки результатов эксперимента. Экспериментальные исследования выполнены с применением стандартных методов изучения и определения свойств материалов, изложенных в ГОСТ, с использованием приборов и оборудования, прошедших поверку и удовлетворяющих требованиям действующих стандартов.

Методологической основой послужили следующие методы:

- метод планирования экспериментов, позволивший количественно оценить влияние эфира поликарбоксилата на свойства цементных композитов, выявить четкие зависимости физико-механических показателей от технологических параметров проведения испытаний, а также от концентрации добавок;

- Проведены исследования испытаний гидронамывного песка для определения его физических, механических, химических свойств;

- Рентгеноструктурный анализ, позволяет провести качественный и количественный фазовый анализ, определить строение кристаллической решётки индивидуальных соединений, процессы распада и синтеза новых соединений образующихся при твердении мелкозернистого бетона.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением: стандартных методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов; статистической обработкой полученных данных с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний, обеспечивающей адекватность проведенного эксперимента; проведением экспериментов с использованием современных поверенных лабораторных приборов и оборудования с достаточной воспроизводимостью результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение высокопрочных мелкозернистых бетонов с пониженным расходом цемента за счет использования микронаполнителя золы-уноса.

2. Исследование гиперпластифицирующих добавок для получения

мелкозернистых бетонов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Закономерности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии компонентов микронаполнителя золы-уноса с добавкой на основе эфира поликарбоксилата.

4. Влияние компонентов микронаполнителя золы-уноса с добавкой на основе эфира поликарбоксилата на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых смесей.

5. Состав для мелкозернистых бетонов с микронаполнителем золы-уноса и добавкой на основе эфира поликарбоксилата.

6. Результаты исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов на их основе из микронаполнителя золы-уноса с добавкой на основе эфира поликарбоксилата.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на:

1. Международный научно-технический симпозиум IV Международный Косыгинский Форум. – Москва, 2024 г.

2. Международная научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ». – Омск, 2025 г.

3. Международный научно-технический симпозиум V Международный Косыгинский Форум. – Москва, 2025 г.

Публикации. На основании результатов исследований было опубликовано 8 работ, из которых 1 в научных журналах принадлежащих перечню ВАК. Получен патент на изобретение.

Содержание работы

Для экспериментальных исследований мелкозернистого бетона применялись следующие сырьевые материалы:

- В качестве вяжущего материала применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства «SLK Cement» (г. Омск) с содержанием C_3A

(трехкальциевый алюминат) – 6,5 %; C_3S (трехкальциевый силикат) – 63,3 %; C_2S (двухкальциевый силикат) – 14,7 %; удельная поверхность по Блейну – 382 м²/кг; тонкость помола цемента (остаток на сите № 009) – 0,1 %; нормальная густота – 28,8 %; предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток – 58,3 МПа.

В качестве мелкого заполнителя использовался гидронамывной кварцевый песок, добываемый из русла р. Иртыш, без глинистых примесей, камней и посторонних включений (модуль крупности $M_{кр}$ – 1,8, истинная плотность $\rho = 2500$ кг/м³, насыпная плотность 1635 кг/м³, водопотребность – 4,1%)

В качестве микрозаполнителя в работе применялась тонкодисперсная зола-унос, взятая с производства ТЭЦ-4 при сжигании каменного Экибастузского угля в г. Омске. Характеристики активных минеральных компонентов применяемой золы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики активных минеральных компонентов

Показатель	Содержание основных оксидов, %	ППЦ, %	Влага, %	Удельная поверхность по Блейну, м ² /кг
CaO	1,12	1,13	0,10	382
MgO	0,69			
Al ₂ O ₃	29,87			
SiO ₂	60,89			
Fe ₂ O ₃	3,96			
Na ₂ O + K ₂ O	0,77			

В качестве пластифицирующих добавок применялась высокоэффективная добавка на основе поликарбоксилата, суперпластификатор – СТАХЕМЕНТ 2000-М, изготовленная заводом ООО Поликарбоксилатов «Оренбуржье», плотность $\rho = 1020$ кг/м³, водородный показатель – 4-7 рН, содержание хлорид-ионов, в % от массы – 0,1, дозировка согласно паспорту качества составляет 0,7 % от массы вяжущего. Добавка вводилась вместе с водой затворения (предпочтительно с последней

треть воды) – по рекомендации производителя. Для сравнения свойств мелкозернистого бетона с микронаполнителем и добавкой использовался суперпластификатор С-3 содержащий высокомолекулярные полинафталинметилсульфонаты натрия и Полипласт Премиум (ПП) состоящий из молекул нафталинформальдегида и полиметиленафталинсульфоната, близок к свойствам добавок на основе поликарбоксилатов.

Для проведения экспериментальных исследований подобраны идентичные (по расходу цемента и заполнителей) состав МЗБ на основе песка, минерального компонента и добавки.

В ходе лабораторного исследования были определены нормируемые показатели, на основе которых оценивались подвижность, расплыв и удобоукладываемость бетонной смеси. Для дальнейшего анализа прочности, мелкозернистого бетона были изготовлены бетонные образцы. Их испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 26633-2015.

Все образцы выдерживались в нормальных условиях до достижения проектного возраста 28 суток. Эти условия обеспечивались в камере нормального твердения, где температура поддерживалась на уровне $20 \pm 2^\circ\text{C}$, а относительная влажность воздуха составляла не менее 90%.

Сравнительные испытания бетонных образцов продемонстрировали эффективность добавки на основе эфира поликарбоксилатного суперпластификатора СТАХЕМЕНТ 2000-М в сравнении с традиционным сульфонафталинформальдегидным суперпластификатором С-3.

Выявлены наиболее эффективные и реологически совместимые компоненты мелкозернистого бетона с микронаполнителем золой-уноса и добавкой на основе эфира поликарбоксилата, где установлены закономерности их комплексного влияния на процессы гидратации цемента, формирование структуры и прочностные свойства цементного камня.

Для выбора наиболее эффективного минерального компонента комплексной добавки исследована пуццолановая активность золы-уноса. Применение золы-уноса до 20% в бетонную смесь положительно

сказывается на мелкозернистом бетоне. Зола-уноса делает бетон более плотным и прочным, а также повышает его устойчивость к низким температурам и способность противостоять проникновению воды. Зола обладает пуццолановыми вяжущими свойствами, что позволяет ей частично заменить цемент. Введение золы-уноса замедляет сроки схватывания, это объясняется тем, что процесс гидратации протекает медленнее. Зола придаёт бетонной смеси пластичность. Благодаря своей шарообразной форме, она обеспечивает «шарикоподшипниковый эффект», который улучшает скольжение цемента и песка по поверхности золы. Это позволяет уменьшить количество воды, необходимой для затворения бетонной смеси, и получить мелкозернистый бетон с высокой плотностью и прочностью при оптимальном количестве цемента.

Одновременное использование золы и поликарбоксилатов снижает пористость в момент контакта цементного камня с заполнителем, что в свою очередь приводит к увеличению прочности при сжатии, соответственно, призмочной прочности. Формируется более плотная структура межзернового пространства заполнителей и менее дефектная контактная зона заполнителей с цементным камнем. Замещение части цемента золой и присутствие поликарбоксилатов приводит к снижению усадочной деформации (рис. 1).

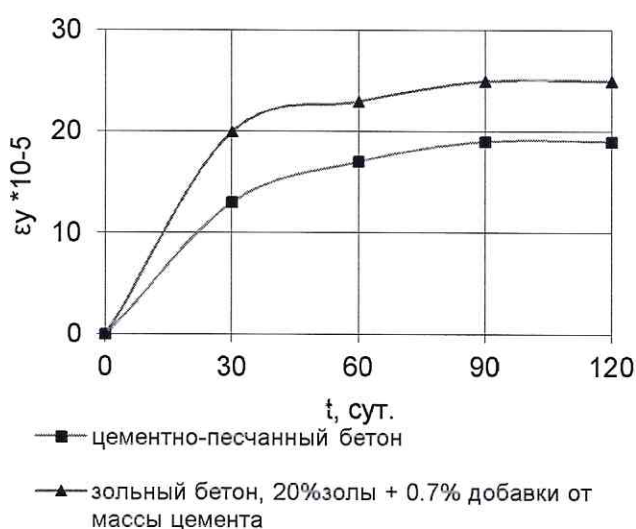


Рис.1. Кривые усадки

Это объясняется тем, что зола адсорбирует из цемента растворимые щелочи и образует устойчивые, нерастворимые алюмосиликаты и

улучшением диспергирования золы в цементной пасте за счет применения поликарбоксилатов, способствующих повышению стойкости бетонной смеси к расслоению. И как следствие, увеличивает сопротивление к образованию трещин в бетоне.

Концентрация напряжений в зоне контактов зёрен заполнителя с матрицей, оцениваемая коэффициентом концентрации напряжений η , является потенциальным источником микротрещин. В плёнке цементного камня концентрации растягивающих напряжений η нет даже в элементах, расположенных на границе с порами. При дальнейшем увеличении толщины плёнки расширяются зоны растягивающих напряжений в цементном камне и увеличивается значение коэффициента η , что и способствует появлению микротрещин (рис. 2).

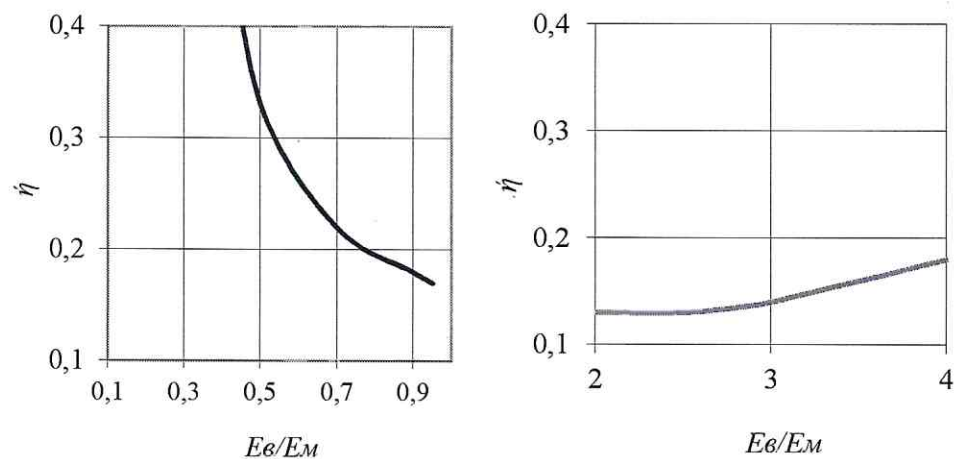


Рис. 2. Зависимости коэффициентов концентрации максимальных растягивающих напряжений η от соотношения модулей упругости

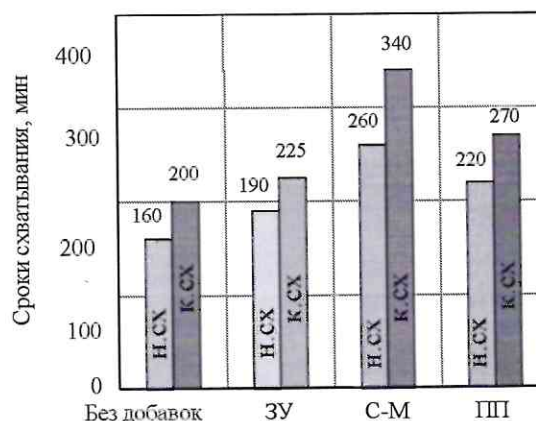
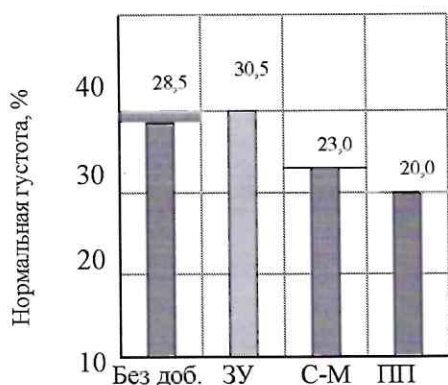
Такая особенность распространения растягивающих напряжений в бетоне объясняется тем, что напрягающий бетон создает обжатие бетонного ядра, роль, которого выполняет более жёсткий заполнитель по отношению к находящемуся между ним тонкому слою более упругого золоцементного камня. Поры в золоцементном камне определяют наличие в нём растягивающих напряжений. Но более жёсткий заполнитель обеспечивает всестороннее обжатие цементного камня и воспринимает на себя растягивающие напряжения. Начальное микротрещинообразование

предполагается в заполнителе, так как максимальные напряжения в золоцементном камне на порядок меньше, чем в заполнителе, то есть чем толще плёнка золоцементного камня, тем меньше необходима нагрузка для появления микротрещин. При увеличении нагрузки трещины намечаются ближе к центру модели.

Область зарождения и распространения микротрещин можно прогнозировать по областям концентрации растягивающих напряжений. Отсюда следует, что для снижения концентрации растягивающих напряжений в модели золоминерального бетона необходима тонкая плёнка золоцементного камня вокруг песка и усиления контактной зоны, особенно когда в ней имеются поры. Необходимо обеспечить также максимальную плотность золоцементного камня, особенно на границе его контакта с заполнителем.

На следующем этапе исследовано влияние компонентов микрозаполнителя золы-уноса на нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста, прочность цементного камня (рис. 3).

Совместное использование компонентов микрозаполнителя и добавки СТАХЕМЕНТ 2000-М (С-М) приводит к синергическому эффекту. Наблюдается снижение нормальной плотности цементного теста на 30 % и ускорение его сроков схватывания на 40...70 минут. В возрасте 1 суток прочность цементного камня с комплексной добавкой на 27 % выше прочности цементного камня с поликарбосилатом и на 4 % выше прочности образца без добавок.



а)

б)

Рис. 3. Влияние золы-унос и эфира поликарбоксилата на: а) – нормальную плотность цементного теста; б) – сроки схватывания цементного теста

Выявлено, что применение золы-унос в цементных смесях в отсутствие гиперпластифицирующих добавок из-за его повышенной водопотребности и склонности к агрегированию неэффективно и приводит к увеличению нормальной плотности цементного теста на 7 %, снижению прочности цементного камня в возрасте 28 суток.

Использование поликарбоксилатного суперпластификатора Полипласт Премиум (ПП) позволяет снизить нормальную плотность цементного теста на 19 %, однако из-за адсорбции добавки на частицах цемента наблюдается значительное замедление начала и конца схватывания цементного теста на 100 и 140 минут соответственно. Применение поликарбоксилата при постоянном В/Ц приводит к замедлению кинетики твердения и снижению ранней прочности цементного камня в возрасте 1 суток на 18 %, однако в возрасте 28 суток наблюдается уже повышение прочности цементного камня на 18 %.

Физико-механические и эксплуатационные свойства улучшаются, а такие показатели бетонной смеси, как прочность, водонепроницаемость – повышаются. Перечисленные характеристики полученного бетона увеличивают срок службы, снижают проницаемость бетона, повышают декоративность растворной смеси, увеличивают водонепроницаемость растворного шва.

Использование золы ТЭЦ и добавки СТАХЕМЕНТ 2000-М позволяет сократить расход цемента. Анализ испытаний показывает на повышение значений удобоукладываемости и подвижности смеси, это говорит об эффективности применения пластифицирующей добавки.

Для выявления характера изменений фазового состава при гидратации и структурообразовании цементных систем с

микронаполнителем добавкой эфира поликарбоксилата выполнен рентгеноструктурный анализ образцов цементного камня в возрасте 1 и 28 суток твердения.

По результатам количественного рентгенофазового анализа установлено, что применение добавки на основе эфира поликарбоксилата приводит к замедлению процесса гидратации в возрасте 1 суток, оказывает лучше взаимодействие молекул поликарбоксилата с частицами цемента, что в следствии хорошо сказывается на удобоукладываемости, растекаемости бетонной смеси, а в возрасте 28 суток также будет обеспечена высокая прочность цементного камня.

По результатам микроструктурного анализа установлено, что на ранней стадии твердения за счет золы-уноса происходит заполнение пустот между песчинками, увеличивается содержание вяжущего вещества в смеси. Микронаполнитель вводится в количестве 20% от вяжущего вещества, это в свою очередь учитывает его способность связывать свободный гидроксид кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Это позволит обеспечить полное заполнение межзерновых пустот в цементном тесте и сохранить необходимый уровень щёлочности.

Для установления зависимости влияния наполнителя на свойства мелкозернистого бетона и сокращения объема экспериментальной работы, использован метод математического планирования. По результатам математического моделирования получены регрессионные зависимости влияния компонентов микронаполнителя золы-уноса и добавки на основе эфира поликарбоксилата на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых бетонных смесей.

Рассмотрены организация проведения и результаты лабораторных испытаний, представлены результаты исследования расхода добавки на основе эфира поликарбоксилата.

Установлено, что использование микронаполнителя с эфиром поликарбоксилата приводит к повышению прочности мелкозернистых

бетонов, а также способствует уплотнению структуры цементного камня.

Установлено, что использование микронаполнителя с эфиром поликарбоксилата приводит бетонную смесь в подвижность, делая ее удобоукладываемой по сравнению с традиционными мелкозернистыми бетонными смесями. Удобоукладываемость определяется основными факторами: подвижностью и текучестью смеси на этапе заполнения формы, а также пластичностью, в то же время можно говорить о способности материала деформироваться без разрывов. Такие параметры определены, как реологические параметры – предельные значения напряжений сдвига; вязкость; период релаксации, во время которого достигается термодинамическое равновесие.

Показана возможность получения мелкозернистого бетона с микронаполнителем золой-уноса, речного песка и добавкой на основе эфира поликарбоксилата для применения его в монолитном строительстве зданий г. Омска и Омской области. В первую очередь это сказывается на снижении себестоимости строительного материала, а во-вторых это позволит повысить физико-механические свойства бетона.

Применение микронаполнителя с гидравлической активностью и добавкой на основе эфира поликарбоксилата позволяет получить высококачественный мелкозернистый бетон литой консистенции, позволяя укладывать смесь в труднодоступные места, обеспечивая прочностные и эксплуатационные характеристики конструкции.

Прочность исследованных образцов с минеральной добавкой (состав I) составляет 28 МПа и соответствует классу бетона В22,5, для состава II мелкозернистого бетона с микронаполнителем золы-унос и добавки эфира поликарбоксилата (0,8%) - 39 МПа (класс бетона В30), для состава III с микронаполнителем золы-унос и добавки эфира поликарбоксилата (1,2%) - 73 МПа (класс бетона В55). В55 – это достаточно высокий класс прочности бетона, который в построечных условиях монолитного домостроения г. Омска практически не встречается.

Полученные данные важны в практическом отношении для производства бетонных смесей с требуемыми реологическими характеристиками коэффициентом концентрации напряжений ($\dot{\eta}$) и эффективной вязкости, исходя из условий реализации процессов транспортирования и формования бетонных смесей, а также для регулирования параметров этих технологических переделов.

Результаты исследований и корректировка технологических решений проводилась в лаборатории университета СибАДИ и на промышленном оборудовании в заводских условиях на «SLK Cement» г. Омска.

Экономия цемента объяснена, тем, что микронаполнитель золы-уноса в составе смешанного вяжущего (золоцементного) при твердении проявляет пуццолановую активность.

Разработана технология приготовления мелкозернистого бетона состоящая из компонентов микронаполнителя золы-уноса, добавки на основе эфира поликарбоксилата и речного песка.

Заключение

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение высокопрочных бетонов с пониженным расходом цемента за счет применения микронаполнителя золы-уноса и добавки на основе эфира поликарбоксилата.

2. Выявлены наиболее эффективные и реологически совместимые компоненты микронаполнителя по результатам исследования пуццолановой активности золы-уноса и реологической эффективности добавки на основе эфира поликарбоксилата суперпластификаторов.

3. Установлены закономерности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии микронаполнителя. Выявлено, что комплексное использование добавок золы-уноса и эфира поликарбоксилата приводит к ускорению процессов гидратации цемента в возрасте 1 суток, а при введении добавки на основе эфира поликарбоксилата процесс роста

ранней прочности цементного камня замедляется.

4. В возрасте 28 суток использование микронаполнителя и добавки на основе эфира поликарбосилата приводит к повышению прочностных характеристик связанных с уплотнением структуры цементного камня.

5. Выявлены закономерности влияния заполнителя на характеристику бетонной смеси. Введение в цементное тесто заполнителя уменьшает подвижность бетонной смеси, и тем больше, чем выше содержание заполнителя, его удельная поверхность и пористость. С уменьшением крупности заполнителя подвижность возрастает, а пыль, глинистые и другие загрязняющие примеси снижают подвижность.

6. Обосновано влияние микронаполнителя и добавки на основе эфира поликарбосилата на подвижность бетонной смеси и её водопотребность. В жёстких бетонных смесях эффективность действия пластификатора и суперпластификатора уменьшается, так как количество воды оказывается недостаточным для обеспечения их действия.

7. Выявлено, что качество вяжущего влияет на реологические характеристики бетонной смеси, так применение цемента с более высокой нормальной плотностью понижает подвижность бетонной смеси при постоянном расходе воды.

8. Установлено, что использование микронаполнителя золы-уноса позволяет уменьшить водоотделение мелкозернистых бетонных смесей и улучшить физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

9. Выявлено, что в бетонах с микронаполнителем происходит формирование более плотной и однородной структуры контактной зоны цементного камня с заполнителем. Использование микронаполнителя золы-уноса с добавкой эфира поликарбосилата улучшает бетонную смесь, делая её удобоукладываемой.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Проектирование состава мелкозернистого самоуплотняющего бетона на основе эфира поликарбоксилата / Ращупкина М.А., Решетникова К.В., Борисенко М.С. В сборнике: V Международный Косыгинский Форум. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики». Москва, 2025. С. 276-280.
2. Реологические свойства мелкозернистой бетонной смеси – будущее качество бетона / Борисенко М.С., Решетникова К.В. В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ». Омск, 2025. С. 575-578.
3. Выбор правильного технологического подхода в системе цемент – мелкий заполнитель / Борисенко М.С., Решетникова К.В., Ращупкина М.А. В сборнике: IV Международный Косыгинский Форум "Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета". Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума "Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны". Материалы IV Международного Косыгинского Форума; Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума. Москва, 2024. С. 280-283.
4. Раскрытие потенциала вяжущего в системе "цемент-мелкий заполнитель" для мелкозернистого бетона / Борисенко М.С., Решетникова К.В., Ращупкина М.А. Путевой навигатор. 2024. № 61 (87). С. 30-35.
5. Эффективность применения циклического вибрирования при изготовлении мелкозернистого бетона / Борисенко М.С., Решетникова К.В., Ращупкина М.А. В сборнике: Перспективные задачи инженерной науки. Сборник статей XIV Международного научного форума. Москва, 2023. С.

363-368.

6. Влияние суровых климатических условий на прочность мелкозернистого бетона / Борисенко М.С., Решетникова К.В. В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Омск, 2022. С. 255-257.

7. Регулирование механических свойств мелкозернистого бетона на активированном мелком заполнителе / Борисенко М.С., Решетникова К.В. В сборнике: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий. Омск, 2022. С. 436-438.

8. Мелкозернистый бетон с оптимальным зерновым составом заполнителя / Борисенко М.С., Решетникова К.В., Ращупкина М.А. В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. Омск, 2022. С. 484-487.

патент на изобретение:

9. Патент № 2857619 С1 Российская Федерация. Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон / М.А. Ращупкина, К.В. Решетникова, М.С. Борисенко; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)” – № 2025106622.