

На правах рукописи



**Смирнов Александр Олегович**

**САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН С КОМПЛЕКСНОЙ  
ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ**

**2.1.5. Строительные материалы и изделия  
(технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: **доктор технических наук, профессор  
Добшиц Лев Михайлович**

Официальные оппоненты: **Тараканов Олег Вячеславович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Пензенский государственный  
университет архитектуры и строительства»,  
факультет «Управление территориями», декан

**Петропавловская Виктория Борисовна,**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тверской государственный  
технический университет», кафедра  
производства строительных изделий и  
конструкций, профессор

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства»

Защита состоится «12» октября 2023 г., в 11:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ауд. 329, ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ)  
<https://www.miit.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бадзина Елена Сергеевна

## 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 мировой строительной практике при возведении различных объектов все шире применяются самоуплотняющиеся бетоны. Самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются высокой подвижностью, благодаря которой они могут растекаться под действием собственного веса и заполнять густоармированные конструкции без уплотнения. Тем не менее, самоуплотняющиеся 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 модифицированных самоуплотняющихся бетонов с пониженным расходом цемента, отличающихся высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Проведённый анализ современного состояния технологии самоуплотняющихся бетонных смесей показывает, что такой результат может быть достигнут только 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.

**Степень разработанности темы.** Рассмотрению закономерностей формирования структуры и свойств модифицированных 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, С.М. Мчедлова-Петросяна, 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, Р.С. Aïtçin, R. Flatt, R. Lewis, J. Plank, I. Schober, M. Schmidt, A.M. Neville, H. Okamura, K. Ozawa, K. Yamada 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 современных поликарбоксилатных суперпластификаторов с различной молекулярной структурой, а также разработка комплексных модификаторов на их основе совместно с активными минеральными добавками для получения самоуплотняющихся бетонов с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками.

**Цель исследования** – разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение высокопрочных и морозостойких бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей с пониженным расходом цемента за счёт использования комплексной органоминеральной добавки.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучить закономерности формирования структуры и свойств самоуплотняющихся бетонов с активными минеральными добавками и суперпластификаторами.

2. Выявить наиболее эффективные и реологически совместимые компоненты комплексной органоминеральной добавки для получения самоуплотняющихся бетонов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Установить закономерности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии компонентов комплексной органоминеральной добавки.

4. Получить регрессионные математические зависимости влияния компонентов комплексной органоминеральной добавки на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов и на их основе разработать наиболее рациональный состав комплексной добавки для самоуплотняющихся бетонов.

5. Разработать рациональные составы самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексной органоминеральной добавкой и изучить физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на их основе.

6. Определить экономическую эффективность применения комплексной органоминеральной добавки в составе самоуплотняющихся бетонных смесей и провести апробацию разработанных составов в производственных условиях.

#### **Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение высокопрочных и морозостойких бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей с пониженным расходом цемента за счет использования комплексной органоминеральной добавки на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и высокодисперсного микрокремнезёма. Выявленный синергический эффект при совместном использовании поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма позволяет значительно улучшить структуру самоуплотняющихся бетонов, снизить их капиллярную пористость и повысить физико-механические и эксплуатационные характеристики, которые невозможно достигнуть при раздельном введении добавок.

2. Установлены закономерности процессов гидратации портландцемента и формирования фазового состава цементного камня в присутствии компонентов комплексной органоминеральной добавки. Выявлено, что использование комплексной добавки способствует ускорению процессов гидратации цемента в возрасте 1 суток и снижению в цементном камне количества непрореагировавших минералов алита – на 13 %, белита – на 10 %, браунмиллерита – на 10 %, трехкальциевого алюмината – на 24 %, а также повышению содержания портландита на 5 % и этtringита – на 14 %. В возрасте 28 суток использование комплексной добавки приводит к формированию более плотной и однородной структуры цементного камня с пониженным содержанием портландита на 40 %, этtringита на 11 % и повышенным содержанием аморфизированных гидросиликатов кальция на 18 %.

3. Выявлено, что использование комплексной органоминеральной добавки приводит к уменьшению основности гидросиликатов кальция в возрасте 28 суток. Если в цементном камне с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора

преобладают высокоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (II) с отношением  $Ca/Si=1,6\dots2,0$ , то при использовании комплексной добавки формируются более прочные и устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) с отношением  $Ca/Si=1,1\dots1,5$ .

4. Установлено, что использование комплексной органоминеральной добавки позволяет значительно снизить водоотделение самоуплотняющихся бетонных смесей и улучшить микроструктуру самоуплотняющихся бетонов. Выявлено, что в бетонах с комплексной добавкой происходит формирование более плотной и однородной структуры контактной зоны цементного камня с заполнителем и снижение капиллярной пористости на 47 %. При этом на границе раздела фаз образуются преимущественно низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) с соотношением  $Ca/Si=1,1\dots1,5$  вместо рыхлых кристаллов портландита, что приводит к улучшению сцепления цементного камня с заполнителем, повышению прочности самоуплотняющихся бетонов на 23 % и увеличению их морозостойкости на 3 марки.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Дополнены теоретические представления о процессах гидратации клинкерных минералов портландцемента, формировании фазового состава, структуры цементного камня и свойств самоуплотняющихся бетонов в присутствии комплексной органоминеральной добавки на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма.

2. Получены регрессионные математические зависимости влияния компонентов комплексной органоминеральной добавки на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов, с помощью которых разработан наиболее рациональный состав комплексной органоминеральной добавки для самоуплотняющихся бетонов.

3. Разработаны рациональные составы самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексной органоминеральной добавкой, обладающие высокой сегрегационной устойчивостью, повышенной текучестью с расплывом конуса  $PK=690\dots730$  мм, вязкостью  $t_{500}=8\dots9$  с и сохраняемостью подвижности более 3 часов в пределах марки по удобоукладываемости PK2, на основе которых получены высокопрочные и морозостойкие самоуплотняющиеся бетоны с классом по прочности B55...B70 и маркой по морозостойкости F<sub>1</sub>500...F<sub>1</sub>1000 при пониженном расходе цемента 300...500 кг/м<sup>3</sup>.

4. Разработанный состав модифицированной самоуплотняющейся бетонной смеси с комплексной органоминеральной добавкой и пониженным расходом цемента апробирован на предприятии ООО «ДельтаСтрой ЖБИ» при изготовлении железобетонных плит для дорожных покрытий ПАГ-14А800.1-1.

5. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» и 08.04.01 «Строительство» в курсах дисциплин «Строительные материалы», «Долговечность строительных материалов и конструкций», «Технология производства современных дорожно-строительных материалов».

**Методология и методы исследования.** 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.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение высокопрочных и морозостойких бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей с пониженным расходом цемента за счет использования комплексной органоминеральной добавки.

2. Результаты определения наиболее эффективных минеральных и пластифицирующих добавок для получения самоуплотняющихся бетонов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Установленные закономерности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии компонентов комплексной органоминеральной добавки.

4. Регрессионные математические зависимости влияния компонентов комплексной органоминеральной добавки на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов.

5. Разработанный рациональный состав комплексной органоминеральной добавки для самоуплотняющихся бетонов.

6. Разработанные рациональные составы самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексной органоминеральной добавкой и результаты исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов на их основе.

**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 проверенных лабораторных приборов и оборудования с достаточной воспроизводимостью результатов.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной междисциплинарной научной конференции «Вавиловские чтения» (г. Йошкар-Ола, 2014-2018); Международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2015-2019); Всероссийской (с международным участием) научной конференции студентов и молодых ученых «Культура инженера: вчера, сегодня, завтра» (г. Йошкар-Ола, 2016); Международной научно-практической конференции молодых преподавателей, аспирантов и студентов «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики регионов России» (г. Йошкар-Ола, 2017); Всероссийском студенческом форуме «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России» (г. Йошкар-Ола, 2017); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» (г. Йошкар-Ола, 2019); Международной научной конференции по проблемам архитектуры и строительства (г. Казань, 2019); Международной научной конференции «Construction the formation of living environment (FORM)» (г. Ханой, 2020; г. Москва, 2021); заседаниях кафедры

строительных технологий и автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (г. Йошкар-Ола, 2019); заседаниях кафедры «Строительные материалы и технологии» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (г. Москва, 2021).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 228 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации составляет 180 страниц, содержит 53 рисунка, 48 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту положения.

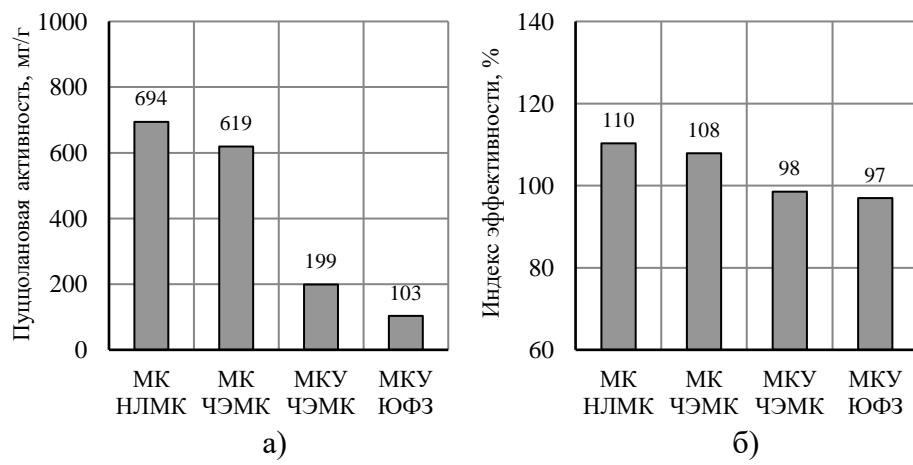
**В первой главе** на основании проведенного литературного обзора рассмотрен механизм гидратации и структурообразования цементных систем, влияние различных факторов на формирование фазового состава и свойства цементного камня. Показаны основные принципы управления структурообразованием твердеющих цементных композиций и повышения эффективности строительных материалов на их основе. Проведён анализ современного состояния технологии самоуплотняющихся бетонов. Выявлена необходимость совершенствования составов самоуплотняющихся бетонных смесей для снижения расхода цемента и повышения их физико-механических и эксплуатационных характеристик. Установлено, что наиболее рациональным способом получения самоуплотняющихся бетонов с пониженным расходом цемента, отличающихся высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, является их комплексное модифицирование пластифициирующими и минеральными добавками, активно влияющими на реологические свойства бетонной смеси, структуру и фазовый состав цементного камня. Выявлено, что в качестве таких добавок целесообразно использовать современные суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, а также высокодисперсные активные минеральные добавки, в частности микрокремнезём.

**Во второй главе** представлены основные характеристики применяемых сырьевых материалов и описаны методы проведения экспериментальных исследований. В качестве вяжущего материала применялся портландцемент ЦЕМ I 52,5Н ГОСТ 31108-2020 производства ООО «Аккерманн цемент» (ООО «Южно-уральская Горно-перерабатывающая Компания») (г. Новотроицк) с удельной поверхностью 400 м<sup>2</sup>/кг, нормальной густотой 28,5 % и следующим минералогическим составом: C<sub>3</sub>S – 62,1 %; C<sub>2</sub>S – 15,8 %; C<sub>3</sub>A – 5,0 %; C<sub>4</sub>AF – 13,2 %. В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок Студёновского месторождения Республики Марий Эл с модулем крупности 1,9, истинной плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup>, насыпной плотностью 1,51 г/см<sup>3</sup>, пустотностью 43 %. В качестве крупного заполнителя применялся щебень из плотных горных пород фракции 5-20 мм Северо-Западного карьера Волковского месторождения Свердловской области с маркой по дробимости 1400, истинной плотностью 3,0 г/см<sup>3</sup>, насыпной плотностью 1,56 г/см<sup>3</sup>, пустотностью 48 %. В качестве активных минеральных добавок в работе использовался микрокремнезём конденсированный неуплотненный МК-85 производства ПАО «Новолипецкий металлургический

комбинат» (НЛМК) и АО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ЧЭМК), а также микрокремнезём уплотненный МКУ-85 производства АО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ЧЭМК) и ОСП «Юргинский ферросплавный завод» АО «Кузнецкие ферросплавы» (ЮФЗ). В качестве пластифицирующих добавок применялись современные суперпластификаторы на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров компании Sika (Московская область, г. Лобня) с различной молекулярной структурой полимеров в виде водного раствора плотностью 1,07-1,09 г/см<sup>3</sup>: ViscoCrete 25 НЕ-С, ViscoCrete 24 НЕ, ViscoCrete 20 НЕ, ViscoCrete 25 RU, ViscoCrete 5 New, ViscoCrete 5200-С. Для сравнения свойств самоуплотняющихся бетонов с комплексной добавкой на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма применялся органоминеральный модификатор МБ 10-01 ТУ 5743-073-46854090-98 поставщика ООО «СтройТехноХим» (г. Балашиха), включающий микрокремнезём (90 %) и суперпластификатор на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов (10 %). В качестве инертной минеральной добавки для снижения расхода цемента в составе модифицированных самоуплотняющихся бетонных смесей использовался минеральный порошок неактивированный марки МП-2 ГОСТ 32761-2014 из карбонатных горных пород производства ООО «Ронгинский карьер» (Республика Марий Эл, пгт. Советский) с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг.

**В третьей главе** выявлены наиболее эффективные и реологически совместимые компоненты комплексной органоминеральной добавки для самоуплотняющихся бетонов и установлены закономерности их комплексного влияния на процессы гидратации цемента, формирование фазового состава, структуру и свойства цементного камня.

Для выбора наиболее эффективного минерального компонента комплексной добавки исследована пущолановая активность микрокремнезёмов различных отечественных заводов ферросплавного производства и эффективность данных добавок в цементных системах (рисунок 1).



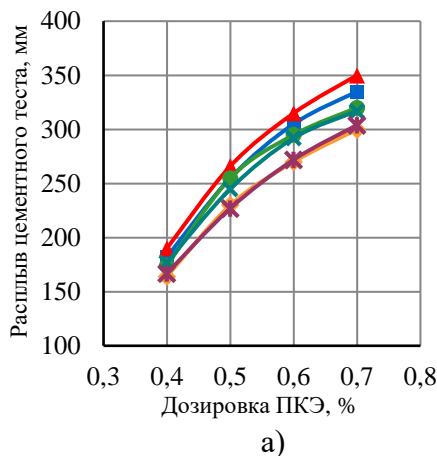
**Рисунок 1 –** Пущолановая активность (а) и индекс эффективности (б) микрокремнезёмов различных заводов ферросплавного производства

По результатам исследований установлено, что наибольшей эффективностью в цементных системах среди рассматриваемых добавок обладает микрокремнезём МК-85 НЛМК, способный связать до 700 мг СаО на один грамм добавки и повысить прочность мелкозернистых бетонов на 10 % при проведении испытаний по методикам ГОСТ Р 56593-2015 и ГОСТ Р 58894-2020.

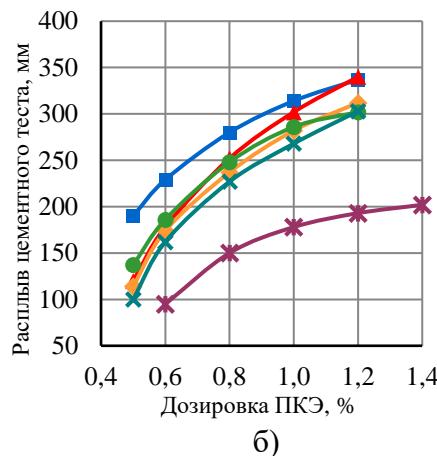
С целью выбора наиболее эффективного пластифицирующего компонента комплексной добавки для самоуплотняющихся бетонов исследована реологическая эффективность современных поликарбоксилатных суперпластификаторов с

различной молекулярной структурой в цементных и цементно-минеральных суспензиях. Многие исследователи отмечают чувствительность поликарбоксилатных суперпластификаторов к минералогическому составу цемента, однако вопросы совместимости поликарбоксилатных суперпластификаторов с высокодисперсными минеральными добавками, в частности с микрокремнезёром, изучены недостаточно.

По результатам исследования расплыва цементного теста при постоянном В/Ц (рисунок 2, 3) установлено, что в цементных смесях без микрокремнезёма пластифицирующая способность поликарбоксилатных суперпластификаторов с различной молекулярной структурой существенно не отличается (рисунок 2а, 3а).



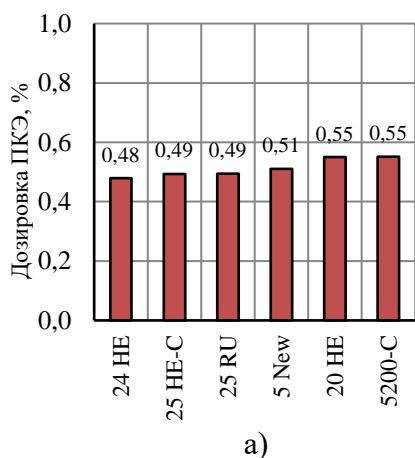
а)



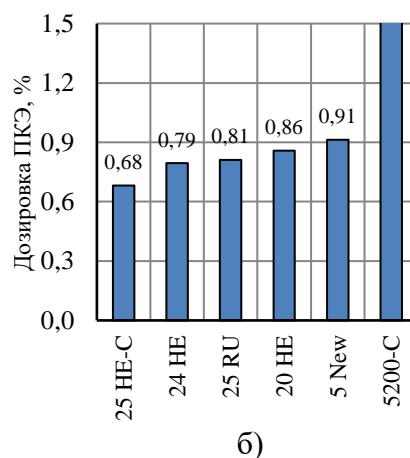
б)

**Рисунок 2 – Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на расплыв цементного теста:**  
а) – без микрокремнезёма;  
б) – с микрокремнезёром

— 25 HE-C — 24 HE  
— 20 HE — 25 RU  
— 5 New — 5200-C



а)



б)

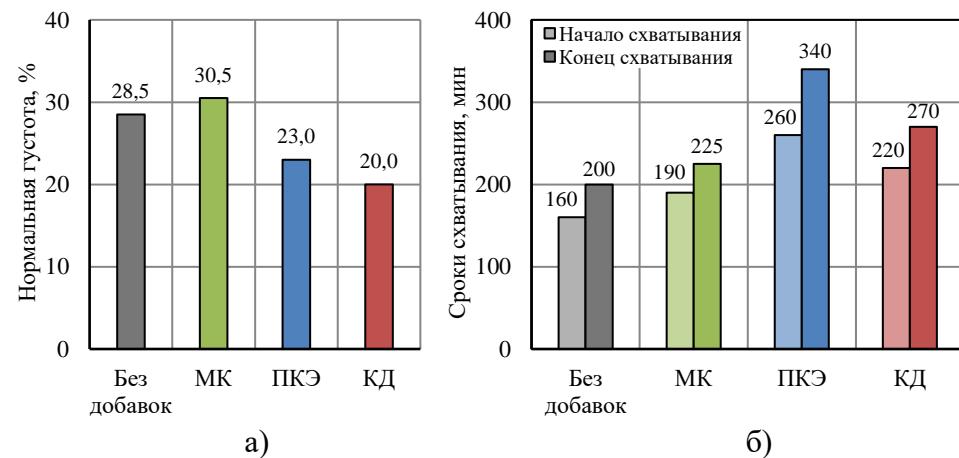
**Рисунок 3 – Дозировки поликарбоксилатных суперпластификаторов, необходимые для получения самоуплотняющихся смесей с расплывом 250 мм:**  
а) – без микрокремнезёма;  
б) – с микрокремнезёром

Однако добавление микрокремнезёма в цементную смесь значительно влияет на реологическую эффективность определенных поликарбоксилатов. Использование суперпластификатора Sika ViscoCrete 5200-C в присутствии микрокремнезёма не позволяет добиться самоуплотняемости цементного теста даже при высоких дозировках добавки (рисунок 2б, 3б), хотя в цементных системах без микрокремнезёма данный суперпластификатор обладает хорошей пластифицирующей способностью, схожей с другими поликарбоксилатами. Это свидетельствует о различной совместимости поликарбоксилатных суперпластификаторов с микрокремнезёром, зависящей от молекулярной структуры полимеров и их способности адсорбироваться на поверхности микрокремнезёма. При этом наибольшей реологической эффективностью в самоуплотняющихся смесях с микрокремнезёром обладает суперпластификатор Sika ViscoCrete 25 HE-C. Использование данного суперпластификатора позволяет достичь наибольшего расплыва цементных смесей с микрокремнезёром при более низких дозировках добавки на 14-25 % по сравнению с другими поликарбоксилатами.

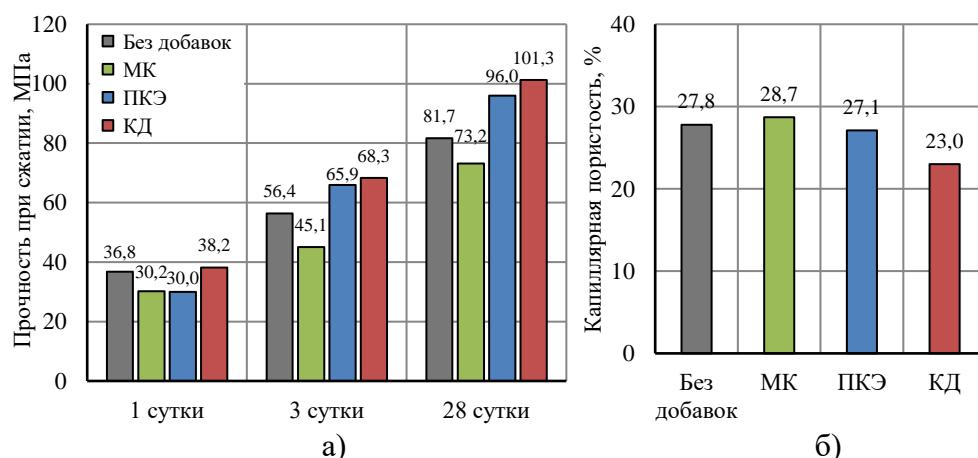
На следующем этапе исследовано влияние компонентов комплексной органоминеральной добавки на нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста, прочность и капиллярную пористость цементного камня (рисунок 4, 5). Выявлено, что применение микрокремнезёма (МК) в цементных смесях в отсутствии пластифицирующих добавок из-за его повышенной водопотребности и склонности к агрегированию неэффективно и приводит к увеличению нормальной густоты цементного теста на 7 %, снижению прочности цементного камня в возрасте 28 суток на 10 % и повышению его капиллярной пористости на 3 %.

Использование поликарбоксилатного суперпластификатора (ПКЭ) позволяет снизить нормальную густоту 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 поликарбоксилатного суперпластификатора 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 24 % и снижение его пористости на 3 %.

Совместное использование компонентов комплексной органоминеральной добавки (КД) приводит к синергическому эффекту. Наблюдается снижение нормальной густоты 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 поликарбоксилатом и на 4 % выше прочности образца без добавок. В возрасте 28 суток комплексное использование добавок позволяет повысить прочность цементного камня на 24 % и снизить его капиллярную пористость на 17 %, что невозможно достигнуть при раздельном введении добавок.



**Рисунок 4 – Влияние компонентов комплексной органоминеральной добавки на: а) – нормальную густоту цементного теста; б) – сроки схватывания цементного теста**



**Рисунок 5 – Влияние компонентов комплексной органоминеральной добавки на: а) – прочность цементного камня; б) – капиллярную пористость цементного камня**

Для выявления характера изменений фазового состава при гидратации и структурообразовании цементных систем с комплексной органоминеральной добавкой выполнен рентгенофазовый анализ образцов цементного камня в возрасте 1 и 28 суток твердения (рисунок 6 и 7, таблица 1).

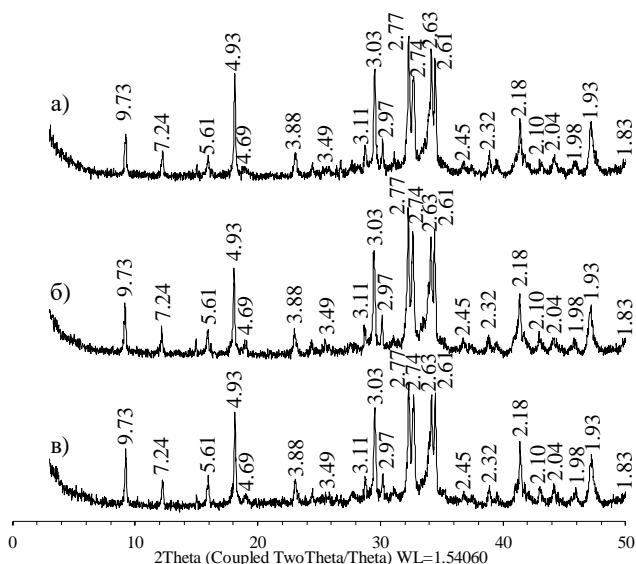


Рисунок 6 – Рентгенограммы цементного камня в возрасте 1 суток: а) – без добавок; б) – ПКЭ; в) – КД

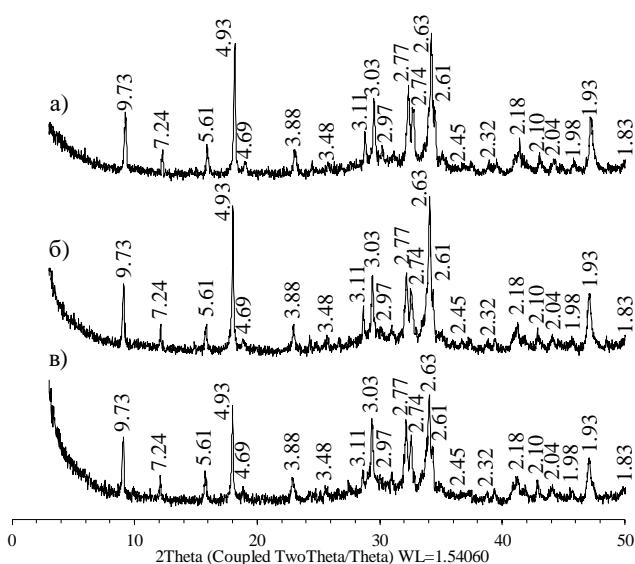


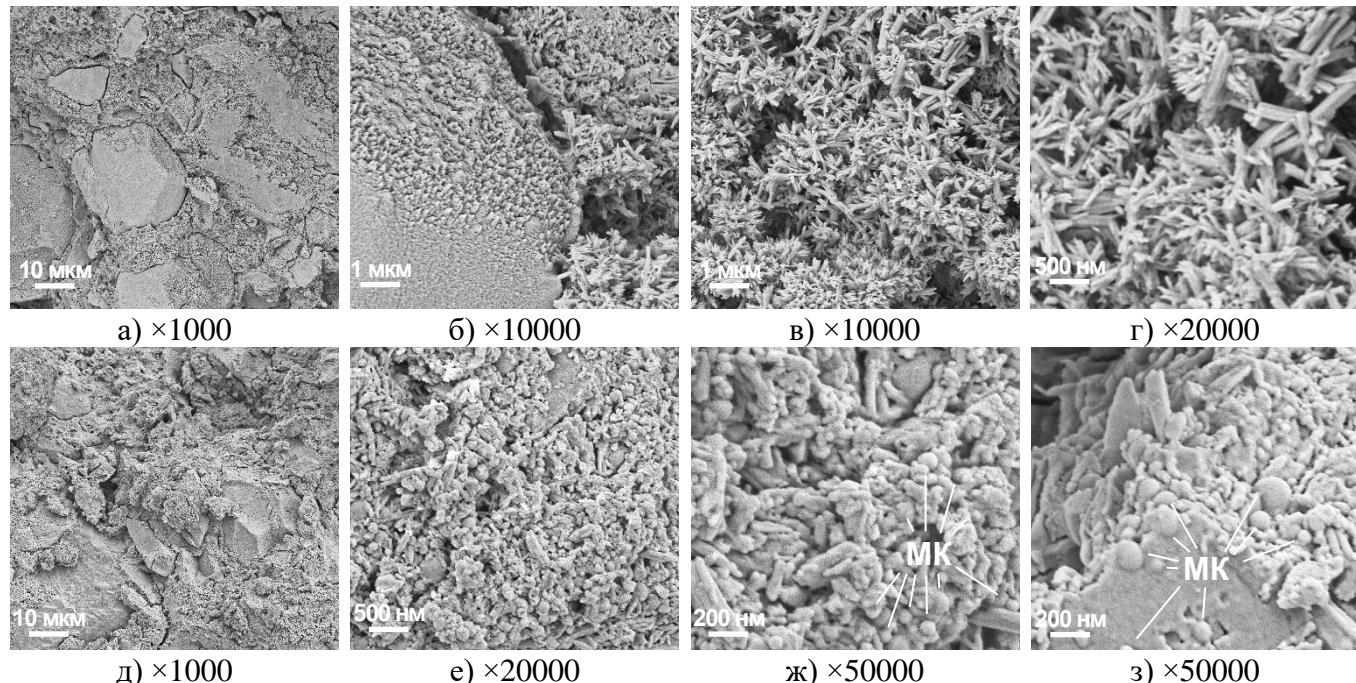
Рисунок 7 – Рентгенограммы цементного камня в возрасте 28 суток: а) – без добавок; б) – ПКЭ; в) – КД

Таблица 1 – Влияние добавок на фазовый состав цементного камня в возрасте 1 и 28 суток

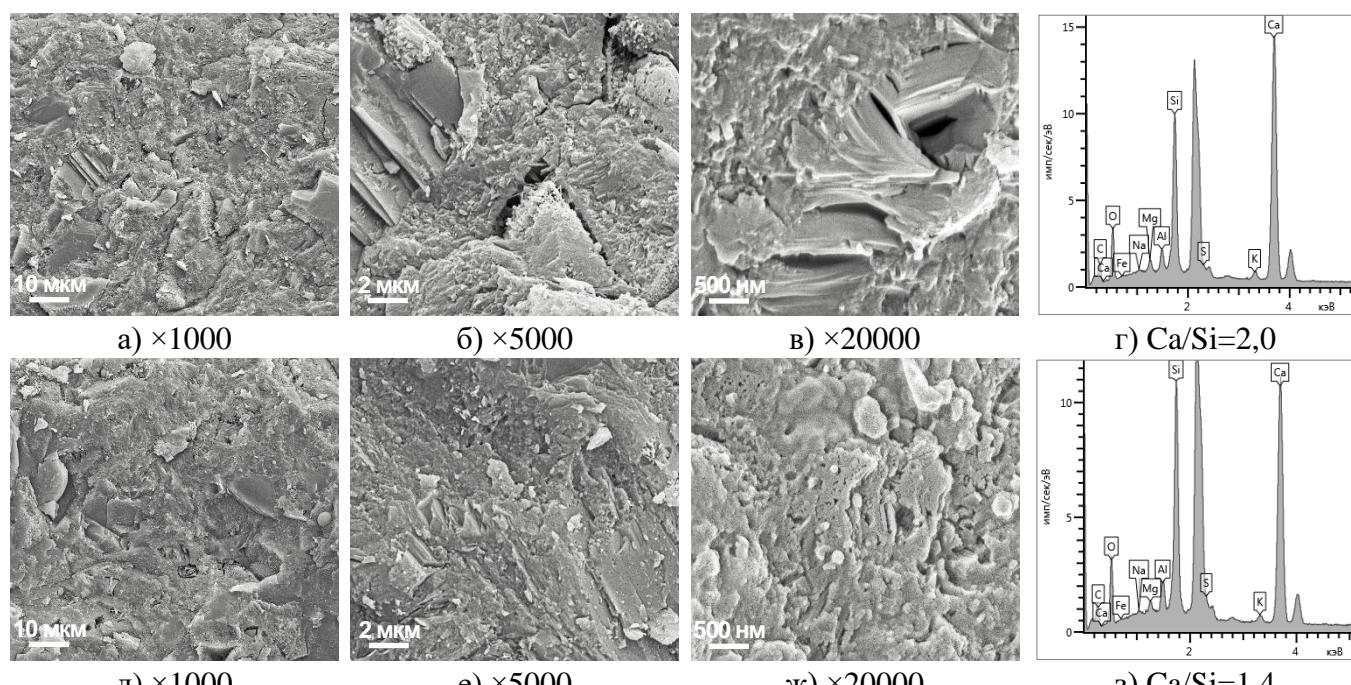
№	Добавка	Фазовый состав цементного камня, %							
		Алит	Белит	Браунмиллерит	Трехкальциевый алюминат	Ангидрит	Портландит	Этtringит	Аморфная фаза
		C <sub>3</sub> S	β-C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> S	CH	C <sub>6</sub> A <sub>2</sub> S <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	C-S-H
1 сутки									
1	Без добавок	33,6	15,6	7,6	3,0	1,0	10,5	7,2	21,5
2	ПКЭ	35,6	15,8	8,5	3,8	1,6	9,1	6,5	19,1
3	КД	31,0	14,2	7,7	2,9	1,4	9,6	7,4	25,8
28 сутки									
1	Без добавок	17,5	12,5	6,8	–	–	13,6	8,3	41,3
2	ПКЭ	14,1	12,3	7,4	–	–	14,9	8,9	42,4
3	КД	14,4	12,2	6,4	–	–	8,9	7,9	50,2

По результатам количественного рентгенофазового анализа установлено, что применение поликарбоксилатного суперпластификатора из-за адсорбции его молекул на клинкерных минералах ингибирует их поверхностное растворение, что приводит к замедлению процессов их гидратации в возрасте 1 суток: альта – на 6 %, белита – на 1 %, браунмиллерита – на 12 %, трехкальциевого алюмината – на 27 %. При этом замедление гидратации цемента приводит к уменьшению содержания гидратных фаз в составе цементного камня: портландита – на 13 %, этtringита – на 10 %, аморфной фазы – на 11 %. Использование комплексной органоминеральной добавки приводит к ускорению процессов гидратации цемента в возрасте 1 суток и позволяет компенсировать замедляющий эффект поликарбоксилатного суперпластификатора. По результатам микроструктурного анализа (рисунок 8) установлено, что на ранней стадии твердения частицы микрокремнезёма, заполняя пустоты в твердеющем цементном камне и уплотняя его структуру, выступают в качестве центров

криSTALLизации, тем самым ускоряя процессы гидратации цемента и повышая плотность упаковки гидратных фаз. Ускорение гидратации цемента также происходит за счёт частичной адсорбции молекул суперпластификатора, блокирующих гидратацию цемента, на поверхности микрокремнезёма. В цементном камне с комплексной добавкой в возрасте 1 суток наблюдается уменьшение содержания непрореагировавших минералов алита – на 13 %, белита – на 10 %, браунмиллерита – на 10 %, трехкальциевого алюмината – на 24 %. При этом ускорение гидратации цемента приводит к увеличению содержания гидратных фаз в составе цементного камня в возрасте 1 суток: портландита – на 5 %, этtringита – на 14 %, аморфной фазы – на 35 % по сравнению с образцом цементного камня с ПКЭ.



**Рисунок 8 – Микроструктура цементного камня в возрасте 1 суток с добавками:**  
а), б), в), г) – ПКЭ; д), е), ж), з) – КД



**Рисунок 9 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток с добавками:**  
а), б), в), г) – ПКЭ; д), е), ж), з) – КД

В возрасте 28 суток использование комплексной органоминеральной добавки приводит к формированию более плотной и однородной структуры цементного камня с пониженным содержанием портландита на 40 % и этtringита на 11 %. При этом в структуре цементного камня с комплексной добавкой преобладают аморфизированные гидросиликаты кальция C-S-H, содержание которых на 18 % выше, чем у образца с ПКЭ. По результатам энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (рисунок 9) выявлено, что использование комплексной добавки приводит к уменьшению основности C-S-H геля. Если в цементном камне с добавкой ПКЭ в возрасте 28 суток преобладают высокоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (II) с отношением  $Ca/Si=1,6\ldots 2,0$ , то при использовании комплексной добавки, за счёт пущолановой реакции микрокремнезёма с  $Ca(OH)_2$ , формируются более прочные и устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) с отношением  $Ca/Si=1,1\ldots 1,5$ .

**В четвертой главе** по результатам математического моделирования получены регрессионные зависимости влияния компонентов комплексной органоминеральной добавки на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов, с помощью которых разработан наиболее рациональный состав комплексной добавки для самоуплотняющихся бетонов.

Для выявления общих закономерностей структурообразования цементных систем в присутствии модифицирующих добавок и определения наиболее эффективного состава комплексной органоминеральной добавки был спланирован двухфакторный эксперимент. Исследования проводились на мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесях при соотношении Ц:П = 1:2 как на растворной составляющей тяжелого бетона. Содержание поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма в составе комплексной органоминеральной добавки варьировалось в следующих пределах:  $X_1$  – количество поликарбоксилатного суперпластификатора Sika ViscoCrete 25 НЕ-С – от 0,4 до 1,2 % массы вяжущего;  $X_2$  – количество микрокремнезёма МК-85 НЛМК, вводимого взамен части цемента – от 5 до 15 % массы вяжущего. Количество воды затворения подбиралось из условия получения равноподвижных самоуплотняющихся смесей с расплывом из конуса Хагермана под действием собственного веса 260...280 мм (форма-конус от встрихивающего столика).

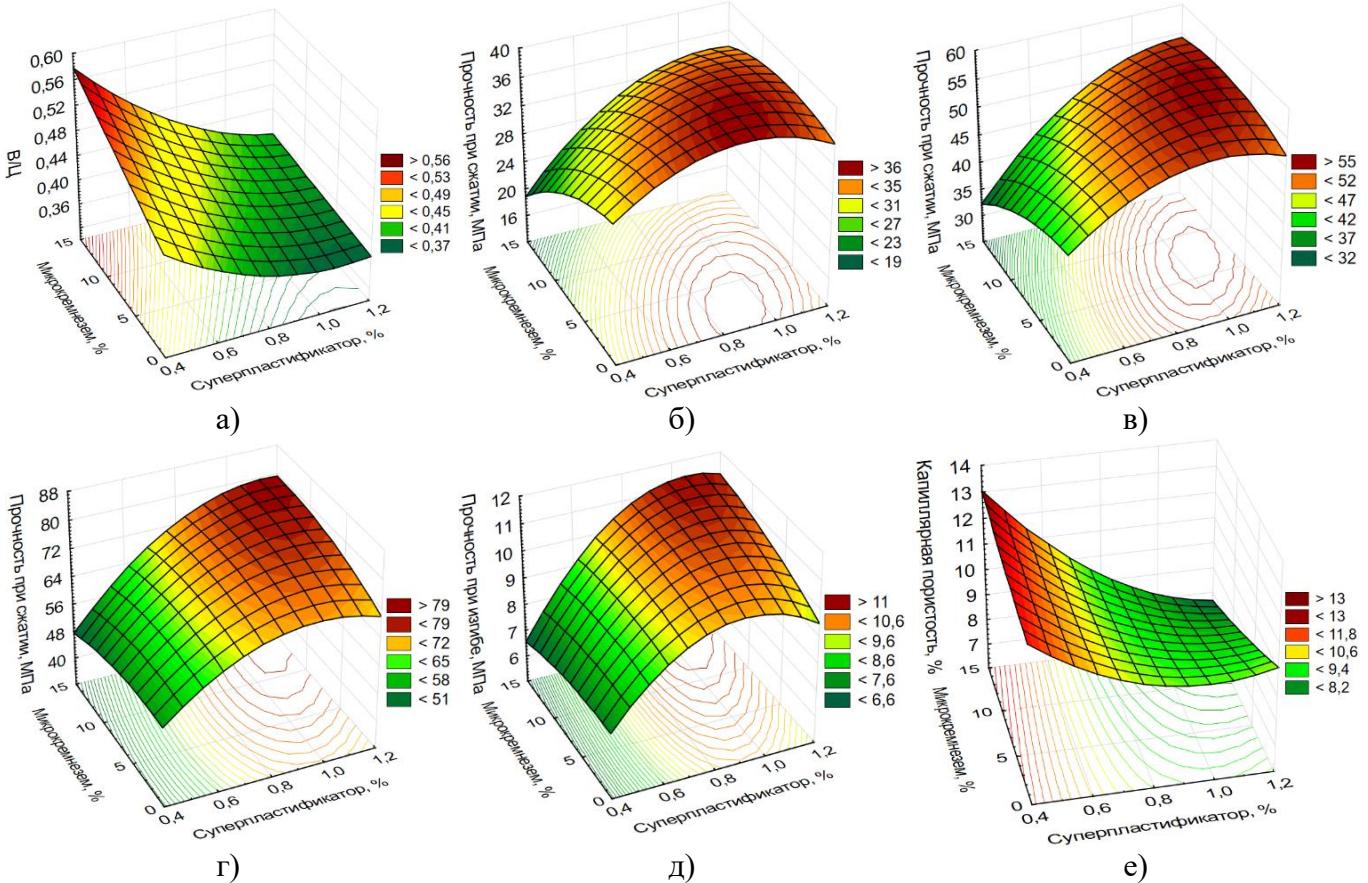
В качестве откликов двухфакторного эксперимента рассматривались: водоцементное отношение самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей (В/Ц); предел прочности при сжатии мелкозернистых бетонов в возрасте 2, 7 и 28 суток ( $R_2$ ,  $R_7$ ,  $R_{28}$ ), предел прочности при изгибе мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток ( $R_{изг}$ ), плотность ( $\rho$ ) и открытая капиллярная пористость ( $\Pi_o$ ) образцов.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели откликов в зависимости от содержания в комплексной добавке поликарбоксилатного суперпластификатора  $X_1$  и микрокремнезёма  $X_2$ , представленные в таблице 2. Расчетные значения критерия Фишера меньше табличных значений при доверительной вероятности 0,95, что подтверждает гипотезу об адекватности полученных регрессионных моделей.

На рисунке 10 представлены поверхности откликов полученных регрессионных моделей в зависимости от содержания в комплексной добавке поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма.

**Таблица 2 – Регрессионные модели откликов**

Параметр, $f(X_1, X_2)$	Модель	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$
$B/I$	$0,605-0,438X_1+0,011X_2+0,203X_1^2-0,0075X_1X_2$	0,55	2,44
$R_2$	$16,1+51,0X_1-0,702X_2-29,4X_1^2-0,037X_2^2+0,975X_1X_2$	1,56	2,51
$R_7$	$23,7+65,4X_1-0,697X_2-35,0X_1^2-0,039X_2^2+1,2X_1X_2$	2,37	2,51
$R_{28}$	$19,9+109,2X_1-0,392X_2-56,3X_1^2-0,043X_2^2+1,39X_1X_2$	1,16	2,51
$R_{\text{изг}}$	$1,14+20,15X_1-0,085X_2-11,0X_1^2-0,004X_2^2+0,218X_1X_2$	2,11	2,51
$\rho$	$2093+294,1X_1-15,1X_2-150,0X_1^2-0,023X_2^2+12,2X_1X_2$	0,09	2,51
$\Pi_0$	$16,4-13,5X_1+0,147X_2+6,87X_1^2+0,002X_2^2-0,28X_1X_2$	1,70	2,51

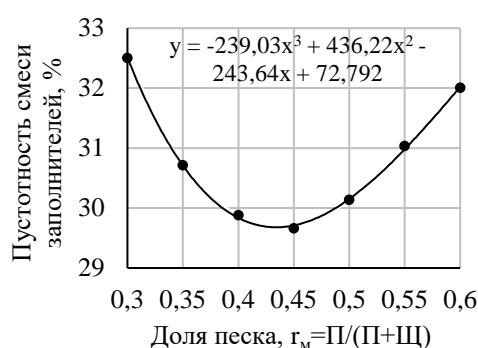


**Рисунок 10 – Поверхности откликов в зависимости от содержания в комплексной добавке поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма: а – водоцементное отношение равноподвижных смесей; б – прочность при сжатии в возрасте 2 суток; в – прочность при сжатии в возрасте 7 суток; г – прочность при сжатии в возрасте 28 суток; д – прочность при изгибе в возрасте 28 суток; е – открытая капиллярная пористость в возрасте 28 суток**

По результатам исследования установлено, что минимальное водоцементное отношение самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей может быть достигнуто при дозировке поликарбоксилатного суперпластификатора в количестве 1 % массы вяжущего. Повышение содержания суперпластификатора более 1 % не приводит к существенному снижению водопотребности смесей и является избыточным. Максимальная прочность при сжатии мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов в возрасте 2 суток может быть достигнута при содержании суперпластификатора 0,8 % и содержании микрокремнезёма 5 % массы цемента. В возрасте 28 суток максимальная прочность при сжатии и максимальная прочность при изгибе мелкозернистых бетонов достигается при содержании суперпластификатора 1 % и содержании микрокремнезёма 10...15 % массы цемента.

Минимальная капиллярная пористость мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток может быть достигнута при содержании суперпластификатора 1,2 % и содержании микрокремнезёма 15 % массы цемента. В рамках экспериментального исследования для приготовления самоуплотняющихся бетонных смесей, с точки зрения повышения ранней и проектной прочности бетона и снижения его пористости, наиболее рациональным является состав комплексной органоминеральной добавки при дозировке поликарбоксилатного суперпластификатора Sika ViscoCrete 25 НЕ-С в количестве 1 % массы вяжущего и дозировке микрокремнезёма МК-85 НЛМК в количестве 10 % массы вяжущего.

**В пятой главе** выполнена разработка рациональных составов самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексной органоминеральной добавкой и изучены физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на их основе.

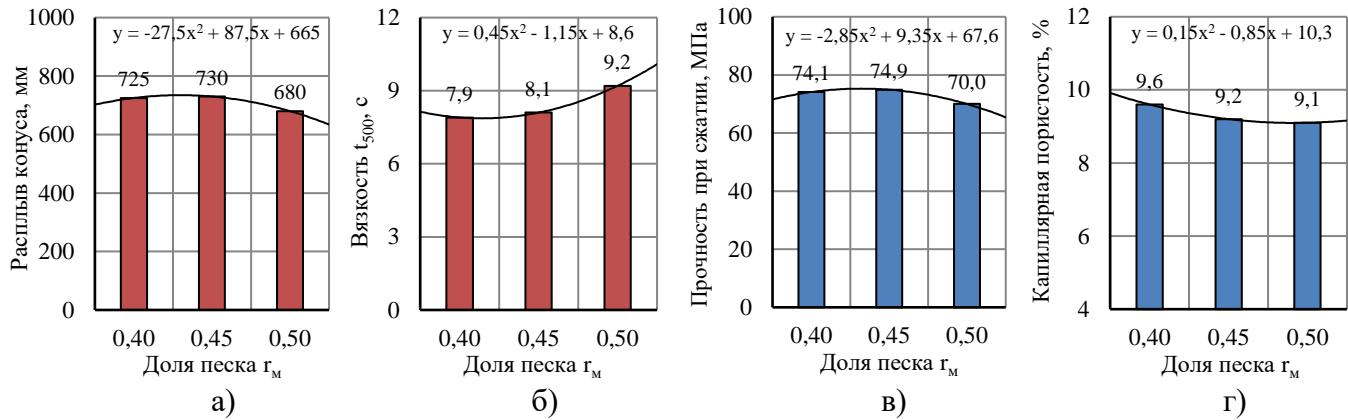


**Рисунок 11** – Пустотность смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня

С целью минимизации расхода цемента на первом этапе выполнен подбор расходов крупного и мелкого заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей. Установлено, что для применяемых заполнителей максимальная плотность упаковки и минимальная пустотность смеси заполнителей достигается при массовой доле песка  $r_m = \Pi/(\Pi + \text{Щ}) = 0,45$  (рисунок 11). Увеличение пустотности заполнителей будет приводить к перерасходу цементного теста в составе самоуплотняющихся бетонных смесей и повышению их стоимости.

Для уточнения содержания крупного и мелкого заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей исследованы их свойства при фиксированном объёме цементного теста, но разном соотношении заполнителей ( $r_m = 0,40; 0,45; 0,50$ ). Расход вяжущего в бетонных смесях был принят 550 кг/м<sup>3</sup> (с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021), расход суперпластификатора – 5,5 кг/м<sup>3</sup> (1 % массы вяжущего), расход воды – 170 кг/м<sup>3</sup> ( $\text{В/Ц} = 0,31$ ). При этом объём цементного теста составлял 350 л/м<sup>3</sup>. Данного объёма цементного теста достаточно для заполнения пустот между зернами заполнителей ( $V_{\text{пуст}} = 297$  л/м<sup>3</sup>, рисунок 11) и формирования необходимой прослойки цементного теста на их поверхности, снижающей трение между частицами заполнителя и повышающей способность бетонной смеси к самоуплотнению.

По результатам исследования (рисунок 12) установлено, что наиболее эффективным соотношением крупного и мелкого заполнителей в составе самоуплотняющейся бетонной смеси, при котором наблюдается минимальная пустотность смеси заполнителей, достигается наилучшая удобоукладываемость бетонной смеси и наибольшая прочность бетонов, является соотношение  $r_m = 0,45$ . Уменьшение количества песка в самоуплотняющихся бетонных смесях до  $r_m = 0,40$  приводит к водоотделению бетонной смеси, ухудшению структуры бетонов, снижению их прочности на 1 % и повышению капиллярной пористости на 4 %. При увеличении доли песка до  $r_m = 0,50$  наблюдается увеличение вязкости и снижение подвижности самоуплотняющейся бетонной смеси, уменьшение прочности бетонов на 7 % и снижение их капиллярной пористости на 1 %.



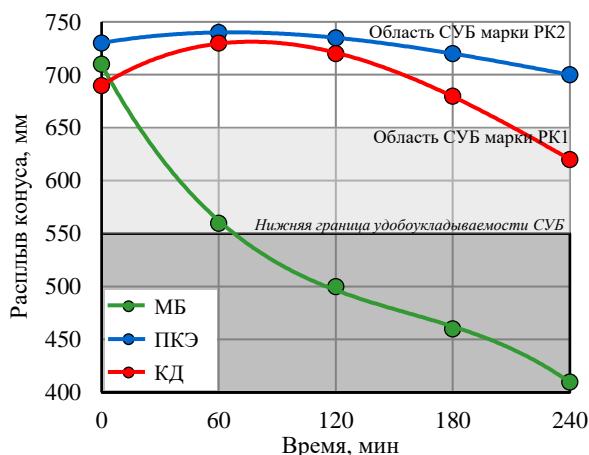
**Рисунок 12 – Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с различным соотношением заполнителей: а – расплыв бетонной смеси; б – вязкость бетонной смеси; в – прочность бетона в возрасте 28 суток; г – капиллярная пористость бетона**

На следующем этапе исследовано влияние комплексной органоминеральной добавки на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей. Составы самоуплотняющихся бетонных смесей приведены в таблице 3. Для сравнения эффективности комплексной добавки на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма использовался органоминеральный модификатором МБ 10-01, включающий микрокремнезём (90 %) и суперпластификатор на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов (СНФ) (10 %).

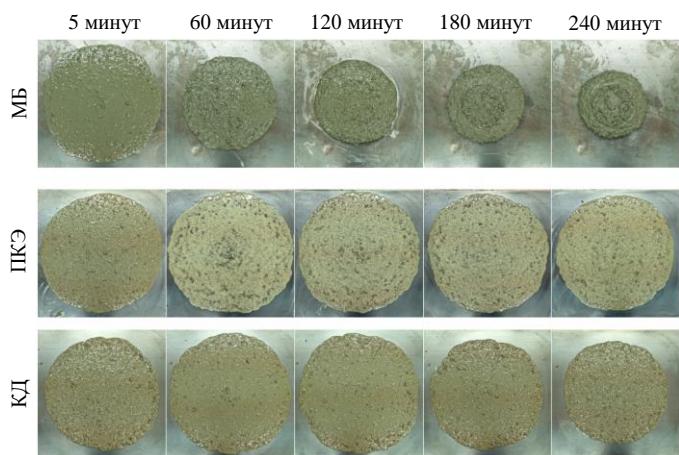
На рисунке 13 и 14 представлены результаты сохраняемости подвижности самоуплотняющихся бетонных смесей и их внешний вид с течением времени.

**Таблица 3 – Составы и свойства самоуплотняющихся бетонных смесей**

№ п/п	Состав	Содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup>								В/Вяж	Расплыв конуса, мм	Вязкость $t_{500}$ , с
		Ц	МБ	ПКЭ	МК	МП	П	Щ	В			
1	Без добавок	550	–	–	–	–	621	1012	248	0,45	–	–
2	МБ	500	111	–	–	–	729	891	220	0,36	710	5,8
3	ПКЭ	550	–	5,5	–	–	828	1012	170	0,31	730	8,0
4	КД	500	–	5,5	50	–	819	1001	170	0,31	690	8,2
5	КД -20%Ц	400	–	5,5	50	100	819	1001	165	0,30	700	8,5
6	КД -40%Ц	300	–	5,5	50	200	819	1001	160	0,29	710	8,9



**Рисунок 13 – Сохраняемость подвижности самоуплотняющихся бетонных смесей с модифицирующими добавками**



**Рисунок 14 – Внешний вид самоуплотняющихся бетонных смесей с модифицирующими добавками с течением времени**

Установлено, что использование модифицирующей добавки МБ на основе МК и СНФ позволяет добиться самоуплотняемости бетонной смеси только при очень высокой дозировке добавки 22 %, вдвое большей, чем при использовании комплексной добавки на основе МК и ПКЭ (таблица 3). При этом сохраняемость подвижности самоуплотняющейся бетонной смеси с модификатором МБ составляет менее 30 минут в пределах марки по удобоукладываемости РК2 (рисунок 13), что не позволяет применять данную бетонную смесь при длительной транспортировке и возведении монолитных конструкций без уплотнения. Использование поликарбоксилатного суперпластификатора обеспечивает длительную сохраняемость подвижности бетонных смесей даже при низких значениях В/Ц=0,31 за счет сильного стерического эффекта добавки. Однако с течением времени самоуплотняющиеся бетонные смеси с добавкой ПКЭ без использования стабилизирующих и водоудерживающих добавок склонны к расслоению и водоотделению (рисунок 14). Использование комплексной органоминеральной добавки позволяет снизить водоотделение, повысить однородность и стойкость самоуплотняющихся бетонных смесей к расслоению без существенного снижения их подвижности. При этом получены стабильные самоуплотняющиеся бетонные смеси, обладающие высокой сегregationной устойчивостью, повышенной текучестью с расплывом конуса РК=690...730 мм, вязкостью  $t_{500}=8...9$  с и сохраняемостью подвижности более 3 часов в пределах марки по удобоукладываемости РК2, что позволяет применять данные бетонные смеси при изготовлении монолитных конструкций без уплотнения.

Исследовано влияние комплексной органоминеральной добавки на физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов (рисунок 15 и 16). Установлено, что использование комплексной добавки приводит к повышению прочности самоуплотняющихся бетонов с поликарбоксилатным суперпластификатором в возрасте 1 суток на 19 %, в возрасте 28 суток – на 23 %, а также способствует уплотнению структуры цементного камня и снижению капиллярной пористости бетонов на 47 %. Кинетика твердения бетонов с комплексной добавкой отличается высокими темпами набора ранней прочности даже несмотря на длительную сохраняемость подвижности самоуплотняющихся бетонных смесей.

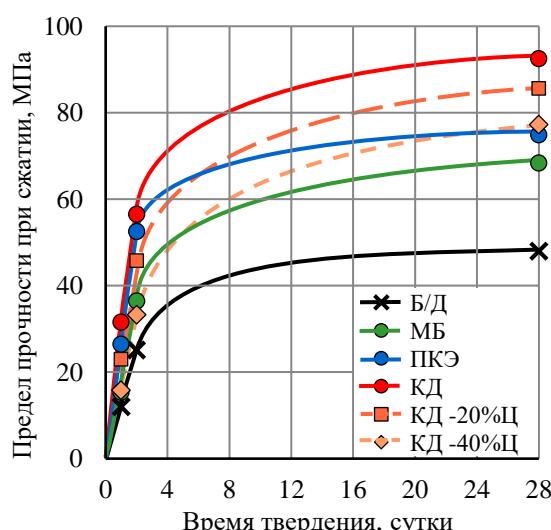


Рисунок 15 – Кинетика твердения самоуплотняющихся бетонов с комплексной органоминеральной добавкой

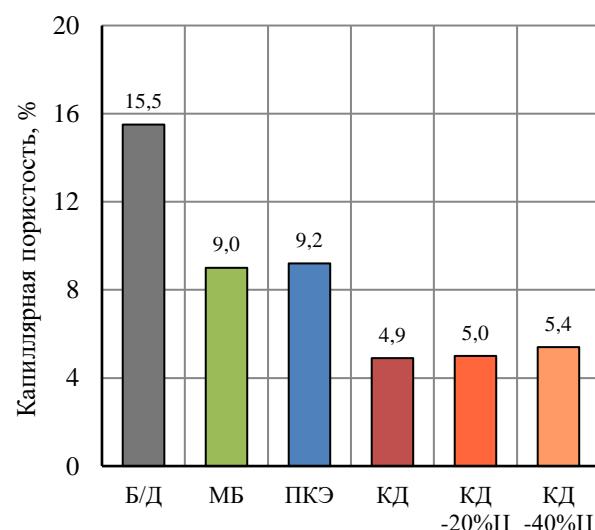


Рисунок 16 – Открытая капиллярная пористость самоуплотняющихся бетонов с комплексной органоминеральной добавкой

В возрасте 1 суток использование комплексной органоминеральной добавки позволяет получить самоуплотняющиеся бетоны с классом по прочности В22,5, в возрасте 2 суток – В40, в возрасте 28 суток – В70 при расходе цемента 500 кг/м<sup>3</sup>.

Так как повышенный расход цемента приводит к значительному удорожанию бетонных смесей, исследована возможность снижения расхода цемента в самоуплотняющих бетонных смесях с комплексной добавкой за счет его замены минеральным порошком МП-2 с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг. Установлено, что самоуплотняющиеся бетоны с комплексной добавкой и пониженным расходом цемента характеризуются замедленной кинетикой набора ранней прочности. Однако на поздних сроках кинетика твердения модифицированных самоуплотняющих бетонов с пониженным расходом цемента превосходит кинетику твердения самоуплотняющих бетонов с добавками МБ и ПКЭ (рисунок 15). По результатам исследования установлено, что использование комплексной органоминеральной добавки позволяет сократить расход цемента в самоуплотняющих бетонных смесях с поликарбоксилатным суперпластификатором до 40 % без снижения проектной прочности бетонов при его замене минеральным порошком.

Далее исследована микроструктура самоуплотняющих бетонов с комплексной органоминеральной добавкой (рисунок 17). Установлено, что в самоуплотняющих бетонах с добавкой ПКЭ контактная зона цементного камня с заполнителем характеризуется повышенной капиллярной пористостью. На границе

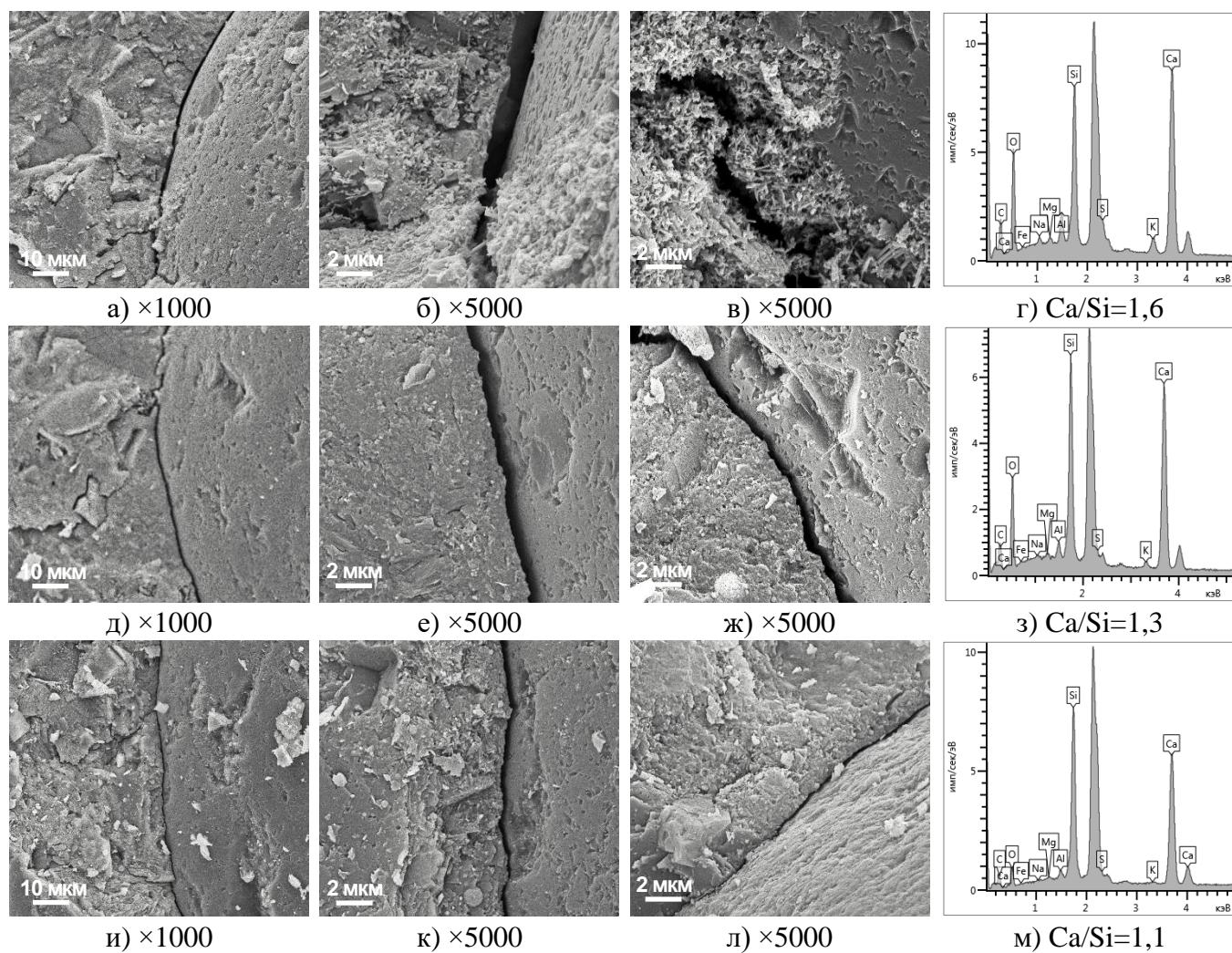


Рисунок 17 – Микроструктура самоуплотняющих бетонов в возрасте 28 суток с модифицирующими добавками: а), б), в), г) – ПКЭ; д), е), ж), з) – КД; и), к), л), м) – КД -40%Ц

раздела фаз формируются преимущественно портландит, этtringит и высокоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (II) с соотношением  $\text{Ca/Si}=1,6\ldots 2,0$ . Использование комплексной добавки приводит к значительному улучшению микроструктуры самоуплотняющихся бетонов. Контактная зона цементного камня с заполнителем в бетонах с комплексной добавкой характеризуется пониженной капиллярной пористостью и имеет более плотную и однородную структуру. На границе раздела фаз формируются преимущественно низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) с соотношением  $\text{Ca/Si}=1,1\ldots 1,5$  вместо рыхлых кристаллов портландита, что приводит к улучшению сцепления цементного камня с заполнителем и значительному увеличению прочности самоуплотняющихся бетонов. При снижении расхода цемента в самоуплотняющихся бетонных смесях с комплексной добавкой до 40 % и его замене минеральным порошком с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  не наблюдается значительного ухудшения микроструктуры самоуплотняющихся бетонов и контактной зоны цементного камня с заполнителем.

Исследовано влияние комплексной органоминеральной добавки на морозостойкость самоуплотняющихся бетонов по третьему ускоренному методу ГОСТ 10060-2012 (рисунок 18). Установлено, что использование комплексной добавки способствует повышению стойкости самоуплотняющихся бетонов к циклическому замораживанию-оттаиванию на 3 марки, что позволяет получить морозостойкие самоуплотняющиеся бетоны с маркой по морозостойкости до  $F_{1100}$  даже без использования воздухововлекающих добавок. Повышение морозостойкости связано со значительным снижением капиллярной пористости самоуплотняющихся бетонов на 47 %, уплотнением контактной зоны цементного камня с заполнителем, а

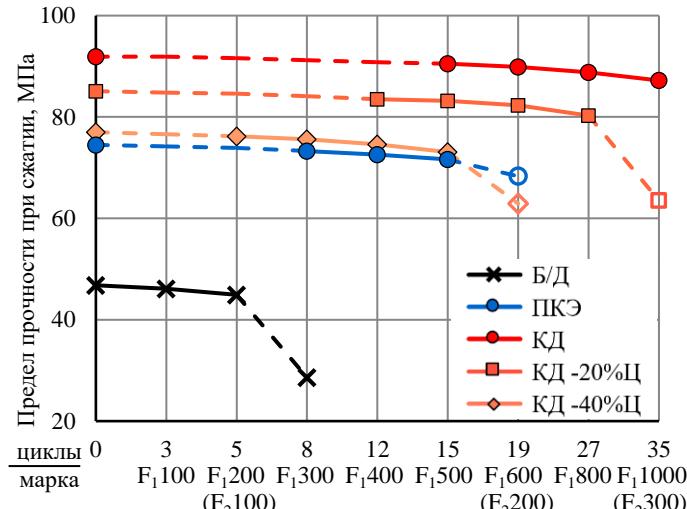


Рисунок 18 – Морозостойкость самоуплотняющихся бетонов с комплексной органоминеральной добавкой

также формированием структуры цементного камня с пониженным содержанием портландита на 40 %, этtringита на 11 % и повышенным содержанием аморфизированных гидросиликатов кальция на 18 %. Также установлено, что разработанная комплексная добавка позволяет сократить расход цемента в самоуплотняющихся бетонных смесях с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров до 30 % без снижения морозостойкости бетонов при его замене минеральным порошком с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

**В шестой главе** приведены результаты технико-экономического обоснования и опытно-промышленной апробации самоуплотняющейся бетонной смеси с комплексной органоминеральной добавкой. Установлено, что применение комплексной добавки в составе самоуплотняющихся бетонных смесей является целесообразным с экономической точки зрения и позволяет значительно улучшить физико-механические и эксплуатационные характеристики самоуплотняющихся бетонов при удорожании бетонной смеси на 2,2 % (154,0 руб. на  $1 \text{ м}^3$ ) или уменьшить её себестоимость на 8,5 % (603,7 руб. на  $1 \text{ м}^3$ ) при сохранении высоких показателей

прочности и морозостойкости бетона. Разработанный состав модифицированной самоуплотняющейся бетонной смеси с пониженным расходом цемента апробирован на предприятии ООО «ДельтаСтрой ЖБИ» при изготовлении железобетонных плит для дорожных покрытий ПАГ-14А800.1-1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение высокопрочных и морозостойких бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей с пониженным расходом цемента за счет использования комплексной органоминеральной добавки на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и высокодисперсного микрокремнезёма.

2. Выявлены наиболее эффективные и реологически совместимые компоненты комплексной органоминеральной добавки для самоуплотняющихся бетонов по результатам исследования пущолановой активности микрокремнезёмов различных заводов ферросплавного производства и реологической эффективности поликарбоксилатных суперпластификаторов с различной молекулярной структурой в цементно-минеральных сусpenзиях.

3. Установлены закономерности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии компонентов комплексной органоминеральной добавки. Выявлено, что комплексное использование добавок микрокремнезёма и поликарбоксилатного суперпластификатора приводит к ускорению процессов гидратации цемента в возрасте 1 суток и снижению в цементном камне количества непрореагировавших минералов альта – на 13 %, белита – на 10 %, браунмиллерита – на 10 %, трехкальциевого алюмината – на 24 %, а также повышению содержания портландита на 5 % и эттритига – на 14 %, что позволяет компенсировать замедляющий эффект поликарбоксилатного суперпластификатора на рост ранней прочности цементного камня. В возрасте 28 суток использование комплексной добавки приводит к формированию структуры цементного камня с пониженным содержанием портландита на 40 %, эттритига на 11 % и повышенным содержанием аморфизированных гидросиликатов кальция на 18 %. При этом происходит значительное уплотнение структуры цементного камня, снижение его капиллярной пористости на 17 % и повышение прочностных характеристик на 24 %, которых невозможно достичь при раздельном введении добавок.

4. Выявлено, что использование комплексной органоминеральной добавки приводит к уменьшению основности гидросиликатов кальция в возрасте 28 суток. Если в цементном камне с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора преобладают высокоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (II) с отношением  $Ca/Si=1,6\dots2,0$ , то при использовании комплексной добавки формируются более прочные и устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) с отношением  $Ca/Si=1,1\dots1,5$ .

5. Получены регрессионные математические зависимости влияния компонентов комплексной органоминеральной добавки на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов, с помощью которых разработан наиболее рациональный состав комплексной органоминеральной добавки для самоуплотняющихся бетонов.

6. Установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно доли песка в смеси заполнителей, на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей. Выявлено, что наиболее эффективным соотношением крупного и мелкого заполнителей в составе самоуплотняющейся бетонной смеси, при котором наблюдается минимальная пустотность смеси заполнителей, достигается наилучшая удобоукладываемость бетонной смеси и наибольшая прочность бетонов, является соотношение  $r_m=0,45$ . Уменьшение количества песка в самоуплотняющихся бетонных смесях приводит к ухудшению структуры, расслоению и водоотделению бетонной смеси. При увеличении доли песка наблюдается увеличение вязкости и снижение подвижности самоуплотняющейся бетонной смеси.

7. Разработаны рациональные составы самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексной органоминеральной добавкой, обладающие высокой сегрегационной устойчивостью, повышенной текучестью с расплывом конуса РК=690...730 мм, вязкостью  $t_{500}=8...9$  с и сохраняемостью подвижности более 3 часов в пределах марки по удобоукладываемости РК2, на основе которых получены высокопрочные и морозостойкие самоуплотняющиеся бетоны с классом по прочности В55...В70 и маркой по морозостойкости F<sub>1</sub>500...F<sub>1</sub>1000 при пониженном расходе цемента 300...500 кг/м<sup>3</sup>.

8. Установлено, что использование комплексной органоминеральной добавки позволяет значительно снизить водоотделение самоуплотняющихся бетонных смесей и улучшить микроструктуру самоуплотняющихся бетонов. Выявлено, что в бетонах с комплексной добавкой происходит формирование более плотной и однородной структуры контактной зоны цементного камня с заполнителем и снижение капиллярной пористости на 47 %. При этом на границе раздела фаз образуются преимущественно низкоосновные гидросиликаты кальция С-S-Н (I) с соотношением Ca/Si=1,1...1,5 вместо рыхлых кристаллов портландита, что приводит к улучшению сцепления цементного камня с заполнителем, повышению прочности самоуплотняющихся бетонов на 23 % и увеличению их морозостойкости на 3 марки. Также установлено, что разработанная комплексная добавка позволяет сократить расход цемента в самоуплотняющихся бетонных смесях с поликарбоксилатным суперпластификатором до 30 % без снижения проектной прочности и морозостойкости бетонов при его замене минеральным порошком с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг.

9. Установлено, что применение комплексной добавки в составе самоуплотняющихся бетонных смесей является целесообразным с экономической точки зрения и позволяет значительно улучшить физико-механические и эксплуатационные характеристики самоуплотняющихся бетонов при удешевлении бетонной смеси на 2,2 % (154,0 руб. на 1 м<sup>3</sup>) или уменьшить её себестоимость на 8,5 % (603,7 руб. на 1 м<sup>3</sup>) при сохранении высоких показателей прочности и морозостойкости бетона.

10. Разработанный состав модифицированной самоуплотняющейся бетонной смеси с пониженным расходом цемента апробирован на предприятии ООО «ДельтаСтрой ЖБИ» при изготовлении железобетонных плит для дорожных покрытий ПАГ-14А800.1-1. Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ПГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» и 08.04.01 «Строительство».

11. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для внедрения строительными предприятиями при изготовлении монолитных и сборных железобетонных изделий и конструкций, где требуется повышенная текучесть и сохраняемость подвижности бетонных смесей, а также высокие физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов.

12. Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении повышения эффективности диспергирования высокодисперсных минеральных добавок путем их химической активации, изучения процессов селективной адсорбции поликарбоксилатных суперпластификаторов в цементно-минеральных системах, совершенствования составов самоуплотняющихся бетонов с комплексными органоминеральными добавками и изучения их эксплуатационных свойств в условиях воздействия агрессивных сред.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

#### ***а) в рецензируемых научных изданиях:***

1. Анисимов, С.Н. Исследование влияния комплекса модификаторов на кинетику твердения бетонов / С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2014. – № 4.

2. Добшиц, Л.М. Влияние кварцевого наполнителя и суперпластификатора Glenium® ACE 430 на раннюю прочность мелкозернистого бетона с ускорителем твердения / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-9. – С. 1901-1905.

3. Анисимов, С.Н. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными добавками / С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

4. Сленьков, В.А. Эффективность применения пластифицирующих добавок в производстве тяжелого бетона / В.А. Сленьков, Ю.А. Минаков, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

5. Минаков, Ю.А. Пластифицированные малоцементные бетоны с добавкой микрокремнезема / Ю.А. Минаков, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

6. Кононова, О.В. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбоксилатного эфира / О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-2. – С. 259-263.

7. Кононова, О.В. Исследование особенностей формирования прочности квазисамоуплотняющегося бетона с микрокремнеземом / О.В. Кононова, А.О. Смирнов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-2. – С. 327-331.

8. Добшиц, Л.М. Прочность жестких бетонных смесей с поликарбоксилатными пластификаторами / Л.М. Добшиц, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов, А.А. Анисимова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2020. – № 4(16). – С. 6-13.

**б) в изданиях, индексируемых международной базой данных Scopus:**

9. Smirnov, A. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand / A. Smirnov, L. Dobshits, S. Anisimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869. – 032039.

10. Smirnov, A.O. Effect of superplasticizer and silica fume on the properties of self-compacting mortars / A.O. Smirnov, L.M. Dobshits, S.N. Anisimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – 012095.

**в) патент на изобретение:**

11. Патент № 2603991 С1 Российская Федерация. Мелкозернистая самоуплотняющаяся бетонная смесь / О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2015117992/03; заявл. 13.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

**г) в других изданиях и материалах конференций:**

12. Смирнов, А.О. Композиционный бетон с высокодисперсным наполнителем / А.О. Смирнов // Интеллектуальная собственность и современные техника и технологии для развития экономики: материалы II республиканской молодежной научно-практической конференции. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – С. 51-55.

13. Смирнов, А.О. Влияние микрокремнезёма на твердение бетона с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова // Восемнадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 189-191.

14. Смирнов, А.О. Структурообразование бетонов с органоминеральными добавками / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов, О.В. Кононова // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016 – Ч. 4., С. 209-212.

15. Смирнов, А.О. Применение минеральных добавок в модифицированных бетонах / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017 – Ч. 4., С. 98-100.

16. Смирнов, А.О. Исследование свойств модифицированных бетонов с органоминеральными добавками / А.О. Смирнов // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы III Всероссийской студенческой конференции в 8 ч. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – Ч. 5., С. 65-67.

17. Смирнов, А.О. Применение отходов ферросплавного производства в бетонах нового поколения / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики регионов России: материалы V Международной научно-практической конференции молодых преподавателей, аспирантов и студентов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 30-35.

18. Смирнов, А.О. Влияние органоминеральной добавки на формирование свойств и долговечность модифицированных бетонов / А.О. Смирнов, О.В. Кононова // Двадцать первые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 254-257.

19. Анисимов, С.Н. Управление кинетикой набора прочности бетона при возведении монолитных конструкций в экстремальных условиях / С.Н. Анисимов, Ю.А. Минаков, Д.А. Семагин, А.О. Смирнов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2018. – № 1(5). – С. 84-89.

20. Смирнов, А.О. Роль микрокремнезёма в формировании структуры бетона / А.О. Смирнов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XIII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018 – Ч. 4., С. 171-174.

21. Смирнов, А.О. Влияние добавки микрокремнезёма на свойства цементных композиций / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Двадцать вторые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 241-244.

22. Смирнов, А.О. Влияние добавок суперпластификатора и микрокремнезёма на свойства самоуплотняющихся бетонов / А.О. Смирнов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XIV международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам: в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019 – Ч. 4., С. 148-150.

**Смирнов Александр Олегович**

**САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН С КОМПЛЕКСНОЙ  
ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ**

**2.1.5. Строительные материалы и изделия  
(технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

---

Подписано в печать 09 июня 2023 г.

Объем 1,5 п.л.

Заказ № 335 от 09.06.2023

Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)