

На правах рукописи



**СТАРЧЕНКО СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СУПЕРПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ И СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ФЛОРОГЛЮЦИН-  
ФУРФУРОЛЬНОГО ОЛИГОМЕРА И НАНО-SiO<sub>2</sub>**

**1.4.10. Коллоидная химия**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

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

**Белгород – 2025**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Научный руководитель** **Полуэктова Валентина Анатольевна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Официальные оппоненты** **Проскурина Виктория Евгеньевна**, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры физической и коллоидной химии ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Соколовский Павел Викторович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических исследований и разработок ФГБУН «Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук»

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.276.01 при ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. ГК 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им. В.Г. Шухова и на сайте: [http://gos\\_att.bstu.ru/dis/Starchenko](http://gos_att.bstu.ru/dis/Starchenko)

Автореферат разослан «22» октября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук



Ж.А. Сапронова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В области коллоидной химии и смежных технологических направлений большое внимание уделяется регулированию реологических свойств и процессов структурообразования в высококонцентрированных минеральных суспензиях. В строительной химии для решения этих задач применяются органические добавки (пластификаторы и суперпластификаторы), изменяющие подвижность смесей за счёт адсорбции на поверхности частиц дисперсной фазы и модификации их поверхностных свойств. Несмотря на широкий ассортимент зарубежных суперпластификаторов, задачи импортозамещения требуют развития отечественных решений, в том числе для аддитивных технологий в строительстве. Для послойного формования при строительной 3D-печати составы должны обладать выраженной тиксотропией: обеспечивать быстрое восстановление структуры после снятия сдвиговой нагрузки и рост статического предела текучести (пластической прочности). Для достижения этих эффектов перспективно использовать совокупность совместимых индивидуальных добавок (органические и неорганические), обуславливающих различные функциональные характеристики комплексной добавки, которые способны придать необходимые свойства смесям для строительной 3D-печати. В связи с этим создание новых органо-минеральных комплексных добавок (ОМКД), обеспечивающих эффективное регулирование реологических свойств и процессов структурообразования в высококонцентрированных минеральных суспензиях, является актуальной научной задачей. Дальнейшие исследования в этой области позволят расширить коллоидно-химические представления о действии комплексных добавок в высококонцентрированных цементных суспензиях, а также увеличить отечественный спектр добавок для аддитивных технологий. Ранее проведенные исследования показали возможность применения в качестве эффективного суперпластификатора добавку на основе флороглюцинфурфуrolного олигомера. Известно также, что введение неорганической добавки в виде частиц  $\text{SiO}_2$  в бетоны способствует снижению дефектности структуры цементного камня за счёт взаимодействия с продуктами гидратации и уплотнения микроструктуры, что приводит к повышению прочностных характеристик материала. Эти факты явились основой научной гипотезы.

Работа выполнялась при финансовой поддержке «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («Умник») № 16621ГУ/2021 от 03.06.2021, РФФИ и Правительства Белгородской области № 14-41-08015 «Поверхностно-активные органо-минеральные модификаторы для концентрированных водных минеральных суспензий, применяемых в строительной индустрии» (2016 г).

**Степень разработанности темы.** В настоящее время ученые мирового сообщества разрабатывают стратегии для решения проблем, связанных с реологией и структурообразованием дисперсных материалов для строительных аддитивных технологий, которые были выявлены в начале 21 века.

Тем не менее, несмотря на уже огромный опыт создания высокодисперсных материалов для различных сфер применения, в том числе на основе минеральных суспензий, остаются не до конца проработанными вопросы об особенностях регулирования реологического поведения и структурообразования высококонцентрированных суспензий для аддитивных технологий.

**Цель работы.** Разработка органоминеральной комплексной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  для получения тиксотропных высококонцентрированных минеральных суспензий, регулирование их реологических свойств и процессов структурообразования с учетом требований строительной аддитивной технологии.

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

- усовершенствование способа получения индивидуальной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера с целью получения добавки с постоянной пластифицирующей активностью и долгим сроком хранения;
- разработка способа получения наночастиц  $\text{SiO}_2$  методом щелочного и кислотного гидролиза раствора жидкого стекла;
- разработка ОМКД на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ ;
- изучение коллоидно-химических свойств ОМКД на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ ;
- исследование влияния ОМКД на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  на реологические свойства и структурообразование в высококонцентрированных суспензиях;
- исследование влияния ОМКД на физико-механические свойства высококонцентрированных суспензий и цементного камня;
- разработка технологической схемы полупромышленного и промышленного производства ОМКД.

**Научная новизна работы.** Установлен механизм снижения эффективности флороглюцинфурфуrolьных олигомеров при синтезе пластифицирующей добавки, заключающийся в том, что параллельно основной реакции конденсации часть фурфуrolа подвергается окислительно-восстановительным превращениям с образованием побочных продуктов реакции (фурилового спирта и Na-соли пиррослизевой кислоты). Определены критические факторы снижения пластифицирующей активности: содержание Na-соли пиррослизевой кислоты более 1% и скорость внесения конденсирующего агента. Показано, что капельное введение фурфуrolа позволяет снизить образование побочных продуктов и повысить функциональную стабильность добавки.

Выявлено влияние флороглюцинфурфуrolьного олигомера в составе комплексной добавки на электрокинетический потенциал микро- и наночастиц  $\text{SiO}_2$ : установлено увеличение абсолютного значения  $\zeta$ -потенциала с -12 мВ до -48 мВ при содержании олигомеров 0,2% по сухому веществу, что приводит к усилению электростатического отталкивания между частицами. Доказан механизм стабилизации наночастиц  $\text{SiO}_2$  индивидуальной добавкой: показано, что при содержании флороглюцинфурфуrolьных

олигомеров 0,2–1,0% происходит замедление процессов коагуляции, при этом размер частиц не превышает 20 нм. Олигомеры, адсорбируясь на поверхности частиц, формируют мономолекулярный защитный слой, который обеспечивает агрегативную устойчивость наночастиц в комплексной органоминеральной добавке.

Выявлены закономерности влияния комплексной органоминеральной добавки на процессы структурообразования в минеральных высококонцентрированных суспензиях. Установлено, что добавка создает дополнительные центры зародышеобразования в процессе гидратации, способствуя формированию более прочной мелкокристаллической структуры цементного камня, обеспечивая повышение ранней прочности материала.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Расширены теоретические представления о механизме синтеза добавок на основе флороглюцинфурфуrolьных олигомеров и механизме влияния побочных продуктов реакции конденсации флороглюцина и фурфурола на пластифицирующие свойства добавок. Определены критические факторы (скорость введения фурфурола, содержание Na-соли пироглиевой кислоты), снижающие эффективность олигомеров, минимизация которых в процессе синтеза обеспечила повышение стабильности добавки во времени.

Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования в цементных смесях и установлены закономерности влияния комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  на реологические свойства высококонцентрированных суспензий, что позволяет оптимизировать процессы формирования структуры бетона на разных стадиях строительной печати.

Разработан автоматизированный аппарат StarXum 2.0, предназначенный для синтеза олигомерных добавок. Устройство обеспечивает высокий уровень точности и повторяемости всех ключевых параметров процесса, что гарантирует стабильное качество получаемых продуктов на каждом этапе синтеза.

Предложен эффективный способ получения комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ , заключающийся в контролируемом изменении скорости внесения конденсирующего агента и оптимизации процесса созревания частиц  $\text{SiO}_2$ . Установлены температурно-временные условия  $t=25\pm 5^\circ\text{C}$ ,  $\tau=3$  сут, качественный и количественный состав компонентов органоминеральной добавки.

Разработана новая комплексная органоминеральная добавка содержащая флороглюцинфурфуrolьный олигомер с концентрацией 110 мг/мл и наночастицы  $\text{SiO}_2$  с концентрацией частиц 3 мг/мл, обладающая полифункциональным действием в высококонцентрированных минеральных суспензиях, применяемых в аддитивных технологиях, позволяющая при концентрации 0,2–0,25% по сухому веществу повысить раннюю прочность цементного камня до 30%, а марочную прочность до 35% по сравнению с

цементным камнем без добавки и сократить сроки схватывания почти в 2 раза (начало – на 46%, а конец – на 52%).

Предложен эффективный способ обезвоживания синтезированной в виде водной дисперсии комплексной органоминеральной добавки методом распыления при температуре 60°C, благодаря которому не происходит значительного роста частиц SiO<sub>2</sub> и не изменяется пластифицирующая способность и активность добавки.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы послужили фундаментальные и прикладные исследования мирового уровня отечественных и зарубежных ученых в области коллоидной химии. Для анализа реологических свойств и этапов формирования структуры материала на основе высококонцентрированных минеральных суспензий использовались классические методы коллоидной химии. Получение высокодисперсных систем, используемых в работе, осуществлялось посредством создания ОМКД, синтезируемой с учетом ранее установленных на кафедре закономерностей модифицирования поверхности частиц суспензий на микро- и нано-уровнях. Исследование химического состава, строения и свойств синтезированных индивидуальной и комплексной добавок проводилось с использованием методов ИК- и УФ-спектроскопии. Коллоидно-химические свойства высококонцентрированных суспензий изучались с применением ротационной вискозиметрии, дисперсионного анализа, лазерной дифракции света, динамического рассеивания света, электрофореза, сканирующей электронной микроскопии и РФА. Для исследования технологических и физико-механических свойств минеральных смесей применялись пластометр Ребиндера, прибор Вика и гидравлический пресс.

**Положения, выносимые на защиту:**

– оптимизированные условия синтеза индивидуальной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера, обеспечивающие минимальное содержание побочных продуктов конденсации;

– состав, условия и способ получения комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц SiO<sub>2</sub> обеспечивающие ее высокую эффективность в минеральных суспензиях;

– влияние комплексной органоминеральной добавки на реологические свойства, агрегативную устойчивость и структурообразование в высококонцентрированных минеральных суспензиях.

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность подтверждается системным анализом научной литературы, выполнением экспериментальных исследований на высоком техническом уровне с учетом требований нормативной документации при использовании обширного спектра современного поверенного и квалифицированного оборудования, стандартных методов и аттестованных методик, достаточным количеством параллельных испытаний и статистической обработкой результатов, обсуждением результатов исследований на конференциях различного уровня.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах: «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова» (Белгород, 2020-2023), Акселератор 2.10. Акселератор БГТУ им. В.Г. Шухова» (Белгород, 2022), «Новогодний стартап баттл» (Белгород, 2022), «Предакселератор НТИ в Точках кипения 2022» (Москва, 2022), «Спартап31. Ярмарка высокотехнологических проектов Белгородской области» (Белгород, 2023), «ONLINE Преакселератор Умник-2023» (Саратов, 2023), «Знания и научный прогресс: новые подходы и актуальные исследования» (Анапа, 2023).

**Внедрение результатов исследований.** Для масштабирования результатов работы разработан технологический регламент на полупромышленное производство ОМКД, получен акт выпуска опытной партии ОМКД, подписан протокол о намерениях, подписана справка о внедрении результатов работы в учебный процесс.

Выпуск опытной партии ОМКД осуществлен на предприятии ЗАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол). Теоретические и экспериментальные результаты исследования используются в подготовке студентов по направлению бакалавриата 18.03.01 – Химическая технология, магистратуры 28.04.03 – Наноматериалы, аспирантуры 04.06.01 – Химические науки, что отражено в рабочих программах дисциплин: «Коллоидная химия», «Прикладная химия», «Общая технология наносистем и наноматериалов», «Современные модификаторы композитов различного назначения и состава».

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования, отражающие основные положения работы, изложены в 11 научных публикациях, в том числе: 3 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий из международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в иных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на изобретение, 2 свидетельства о регистрации ноу-хау.

**Личный вклад.** Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения ОМКД на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  для высококонцентрированных минеральных суспензий, применяемых в строительной 3D-печати. Проведен комплекс экспериментальных работ по изучению коллоидно-химических свойств индивидуальных компонентов и ОМКД, а также физико-механических свойств высококонцентрированных смесей, модифицированных ОМКД. Разработан компонентный состав и предложена технология производства ОМКД.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 174 страницах в шести главах, состоит из введения, основной части, заключения, списка литературы, включающей 186 наименований, содержит 11 таблиц, 57 рисунков, 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При получении высококонцентрированных цементных суспензий для технологии строительной 3D-печати сохраняется ряд коллоидно-химических проблем, связанных с регулированием их реологических свойств и особенностями протекания процессов структурообразования в подвижных смесях. Известные органические пластифицирующие добавки позволяют лишь частично решить существующие реотехнологические противоречия, а минеральные добавки – обеспечить управляемое формирование структуры цементного камня, однако их совместное применение часто сопровождается проблемами несовместимости компонентов.

Исходя из анализа литературных данных и результатов предварительных экспериментов, была сформулирована **научная гипотеза**: введение в состав цементных систем комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц диоксида кремния позволит повысить агрегативную устойчивость и тиксотропию системы, активировать процессы гидратации и твердения за счёт синергетического действия органической и неорганической составляющих.

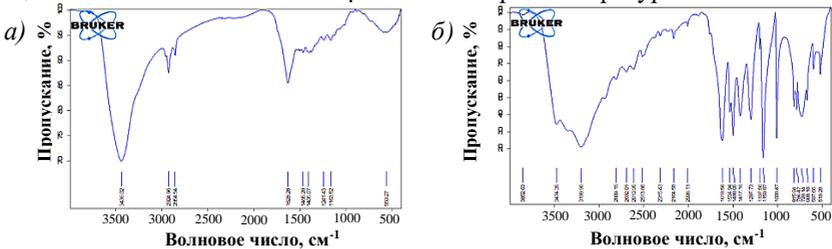
Для синтеза органической составляющей части добавки (далее индивидуальная добавка) использовали следующие мономеры: флороглюцин «ч.» с содержанием 99,0% (ТУ 6-09-3741-79) и фурфурол «тех.» с содержанием 99,3% (ГОСТ Р 57252-2016), так как ранее проведенные исследования в БГТУ им. В.Г. Шухова доказали, что образованные в процессе конденсации флороглюцинфурфуrolьные олигомеры обладают высокой пластифицирующей способностью в цементных и полимерцементных суспензиях, применяемых в строительной печати. Для синтеза минеральной составляющей добавки – наночастиц  $\text{SiO}_2$ , использовали жидкое натриевое стекло (раствор  $n\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) марки «СНЖ1» с силикатным модулем 2,6 (ГОСТ 13078-2021), что экономически обоснованно, ввиду низкой стоимости сырья. Выбор наночастиц диоксида кремния в качестве минеральной составляющей добавки обусловлен их структурно-химическим родством с силикатами кальция и способностью вступать во взаимодействие с гидроксидом кальция, образующимся при гидратации цемента, с образованием дополнительных С–S–Н фаз.

**Усовершенствование синтеза индивидуальной добавки.** Синтез проводили на разработанном автоматическом лабораторном устройстве для синтеза добавок StarXum 2.0 (Ноу-хау № 20170029). Протекание конденсации между флороглюцином и фурфуролом контролировали методом ИК-спектроскопии. Анализ ИК-спектров показал, что в спектре синтезированной индивидуальной добавки (рисунок 1, а) сохраняются полосы в области  $1620 \text{ см}^{-1}$ ,  $1500 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания С=C ароматического кольца);  $1370 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания С–О фенольные);  $1165 \text{ см}^{-1}$  (плоскостные деформационные колебания фенольных ОН– групп);  $1075 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания С–О–С фуранового кольца), а полосы в области  $1680 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания С=О-карбонильные), характерные для функциональной группы фурфурола (рисунок 1, б), исчезают. Появляется интенсивный

пик в области  $3450 \pm 10 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания C–H), что подтверждает факт химической конденсации и доказывает образование химического соединения  $[-\text{C}_6\text{H}(\text{OH})_3-\text{CH}(\text{C}_4\text{H}_3\text{O})-]_n$ .

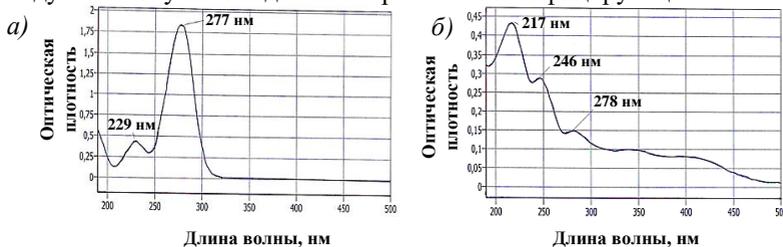
При каждом повторном синтезе олигомера было замечено, что полосы поглощения на ИК-спектрах находились в одной области, но пластифицирующая способность и функциональная стабильность добавок отличалась.

Для решения проблем, связанных с получением добавок разной пластифицирующей способности, были проведены дополнительно исследования процессов, протекающих на разных стадиях синтеза, методом УФ-спектроскопии. Установлено, что мономер флороглюцин не реагирует с щелочным компонентом и не разлагается при температуре синтеза  $70^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 1** – ИК-спектры: *a* – синтезированной индивидуальной добавки; *б* – смеси двух исходных мономеров

Мономер фурфурол, напротив, реагирует с щелочным компонентом даже при комнатной температуре (рисунок 2, *a*) с образованием двух побочных продуктов реакции. С ростом температуры до  $70^\circ\text{C}$  образование побочных продуктов количественно увеличивается (рисунок 2, *б*), соответственно изменяется мольное соотношение и стехиометрическое равновесие в химической реакции при синтезе индивидуальной добавки, ввиду чего получаются добавки с разной пластифицирующей способностью.

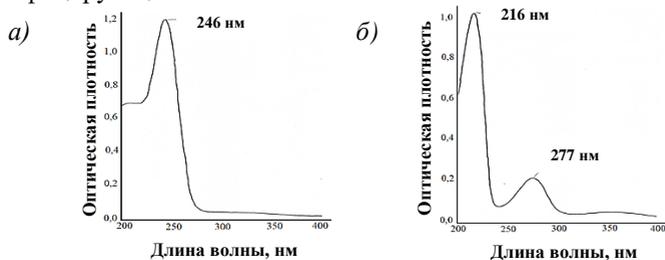


**Рисунок 2** – УФ-спектры взаимодействия фурфурола с щелочью: *a* – при комнатной температуре; *б* – при температуре  $70^\circ\text{C}$

Методом УФ-спектроскопии установлено, что в щелочной среде фурфурол частично подвергается побочным окислительно-восстановительным превращениям с образованием натриевой соли пироглишевой кислоты (рисунок 3, *a*) и фурилового спирта (рисунок 3, *б*), что подтверждается появ-

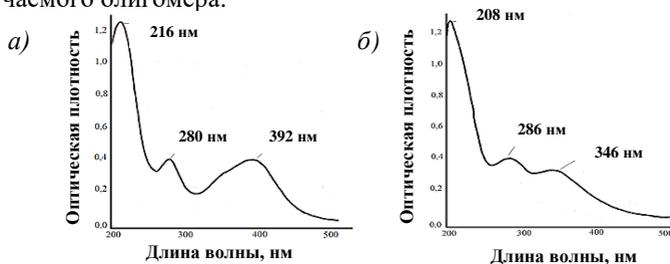
лением характерных полос поглощения в спектре реакционной массы. Показано, что из двух молекул фурфурола образуется одна молекула фурилового спирта и одна молекула пирогликолевой кислоты, которая реагирует с щелочным компонентом с образованием натриевой соли, что приводит к изменению молярного соотношения при синтезе индивидуальной добавки.

Установлено, что от скорости введения фурфурола в реакционную смесь изменяется химическое равновесие при синтезе индивидуальной добавки. При мгновенном способе введения фурфурола в реакционную смесь часть фурфурола расходуется на образование побочных продуктов: фурилового спирта и Na-соли пирогликолевой кислоты (рисунок 4, *а*), и только оставшаяся часть фурфурола реагирует непосредственно с флороглюцином, что приводит к образованию олигомеров разного строения с более низкой пластифицирующей способностью.



**Рисунок 3** – УФ-спектры побочных продуктов разложения фурфурола:  
*а* – Na-соли пирогликолевой кислоты; *б* – фурилового спирта

При капельном способе внесения фурфурола в реакционную смесь реакция протекает без смещения стехиометрического равновесия (рисунок 4, *б*), что приводит к повышению пластифицирующих свойств получаемого олигомера.



**Рисунок 4** – УФ-спектры индивидуальной добавки: *а* – с моментальным введением фурфурола; *б* – с капельным введением фурфурола

Определена пластифицирующая способность олигомеров, полученных разным способом внесения фурфурола, а также мономеров и побочных продуктов реакции методом НИИЖБ с помощью мини-конуса (таблица 1).

Установлено, что Na-соль пирогликолевой кислоты вследствие разложения фурфурола, увеличивает скорость конденсации полученных

олигомеров, в результате чего в значительной мере уменьшается пластифицирующая способность полученной добавки и её стабильность во времени.

Установлено, что фурфурол, флороглюцин, Na-соль пироглизиновой кислоты не обладают пластифицирующими свойствами, в отличие от очищенного фурилового спирта, который имеет слабые пластифицирующие свойства (расплав 7,2 см).

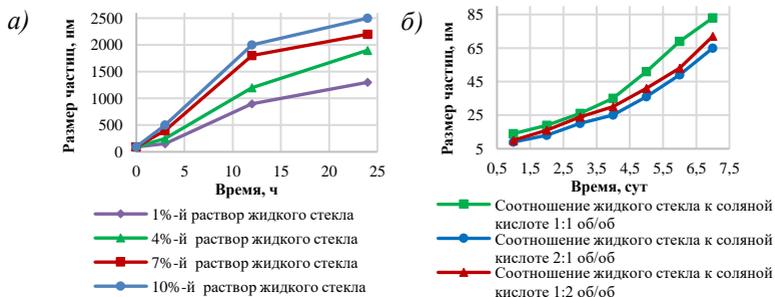
**Таблица 1** – Пластифицирующая способность синтезированных добавок, мономеров и побочных продуктов реакции

Используемый мономер/олигомер	Концентрация добавки, %	Расплав смеси, см
Флороглюцин	0,3	4,5
Фурфурол		4,6
Na-соль пироглизиновой кислоты		4,5
Фуриловый спирт		7,2
Флороглюцинуфурфульный олигомер, полученный при мгновенном способе внесения фурфура		16
Флороглюцинуфурфульный олигомер, полученный при капельном способе внесения фурфура		19

Таким образом, оптимальным способом добавления фурфура в реакционную смесь на стадии синтеза является метод капельного введения, при котором значительно снижается количество образующихся побочных продуктов, что стабилизирует функциональные свойства добавки.

#### Получение минеральной составляющей комплексной добавки.

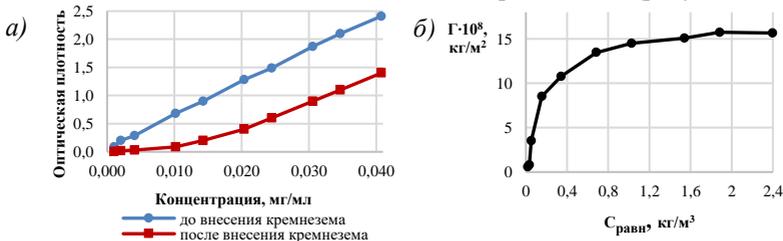
Частицы  $\text{SiO}_2$  синтезировали двумя методами: методом щелочного гидролиза раствора жидкого стекла и кислотным гидролизом раствора жидкого стекла. Показано, что методом щелочного гидролиза возможно получение наноразмерных частиц  $\text{SiO}_2$ . Однако при увеличении концентрации жидкого стекла возрастает степень пересыщения системы, что приводит к ускоренному образованию зародышей и росту частиц  $\text{SiO}_2$  и их последующей коагуляции с формированием крупных агломератов (рисунок 5, а). Повышение температуры дополнительно интенсифицирует агрегацию, в результате чего частицы укрупняются и выпадают в осадок.



**Рисунок 5** – Кинетика формирования агломератов частиц  $\text{SiO}_2$  (а) и роста частиц  $\text{SiO}_2$  (б)

Методом кислотного гидролиза были получены частицы  $\text{SiO}_2$  размером менее 10 нм. Установлено, что в период созревания частиц с 1 до 7 сут происходит увеличение размеров частиц примерно в 7 раз (рисунок 5, б). Оптимальным соотношением для синтеза частиц было принято соотношение растворов реактивов 2:1 об/об ( $n\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 : \text{HCl}$ ).

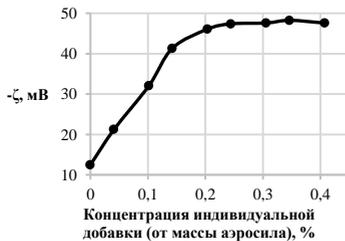
**Изучение адсорбции добавки на частицах  $\text{SiO}_2$ .** Адсорбцию олигомера на частицах  $\text{SiO}_2$  (использовали кремнезем с удельной поверхностью  $102 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) изучали с помощью УФ-спектрофотометра при длине волны 206 нм по убыви концентрации, которую рассчитывали по изменению оптической плотности исследуемых растворов индивидуальной добавки после установления адсорбционного равновесия (рисунок 6, а).



**Рисунок 6** – Зависимость оптической плотности дисперсионной среды до адсорбции и после адсорбции индивидуальной добавки на частицах  $\text{SiO}_2$  (а) и изотерма адсорбции индивидуальной добавки на частицах  $\text{SiO}_2$  (б)

По изотерме адсорбции определяли равновесную концентрацию ( $C_{\text{равн}}$ ) и величину адсорбции (рисунок 6, б). Установлено, что адсорбция индивидуальной добавки на поверхности частиц  $\text{SiO}_2$  имеет мономолекулярный характер и при увеличении концентрации выходит на плато, что свидетельствует о формировании насыщенного адсорбционного слоя олигомеров и практически необратимом их закреплении на поверхности кремнезёма.

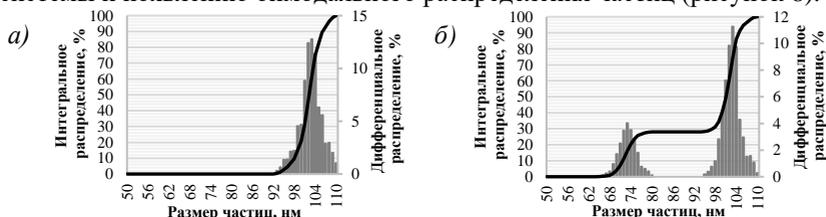
**Исследование электрокинетических свойств и агрегативной устойчивости модифицированных частиц  $\text{SiO}_2$ .** Электрокинетические свойства частиц  $\text{SiO}_2$  (использовали аэросил с удельной поверхностью  $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) изучали по их электрофоретической подвижности в стабильной ионной среде раствора при введении индивидуальной добавки в количестве от 0 до 0,4% по сух. веществу от массы частиц  $\text{SiO}_2$ . По полученным данным строили график зависимости  $\zeta$ -потенциала частиц  $\text{SiO}_2$  от разной концентрации индивидуальной добавки (рисунок 7). Установлено, что введение индивидуальной добавки с



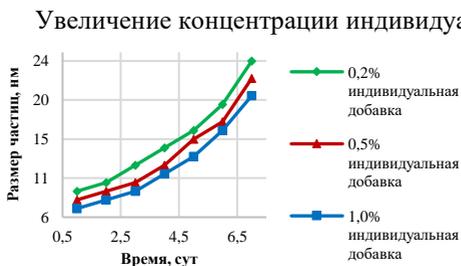
**Рисунок 7** – Зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц  $\text{SiO}_2$  от концентрации индивидуальной добавки

оптимальной концентрацией 0,2% увеличивает абсолютное значение  $\zeta$ -потенциала частиц  $\text{SiO}_2$  с -12 до -48 мВ, что снижает вероятность их коагуляции и повышает стабильность дисперсной системы

Для исследования влияния индивидуальной добавки на агрегативную устойчивость частиц  $\text{SiO}_2$  в суспензию вводили добавку в различных концентрациях и измеряли распределение частиц по размерам. При концентрации добавки 0,2% по сухому веществу наблюдалась частичная пептизация агломератов, обусловленная адсорбцией олигомера на поверхности нано- $\text{SiO}_2$ , что приводит к увеличению электростатической стабилизации системы и появлению бимодального распределения частиц (рисунок 8).



**Рисунок 8**– Кривые объёмного распределения агломератов  $\text{SiO}_2$ : *a* – до внесения индивидуальной добавки; *б* – после внесения индивидуальной добавки



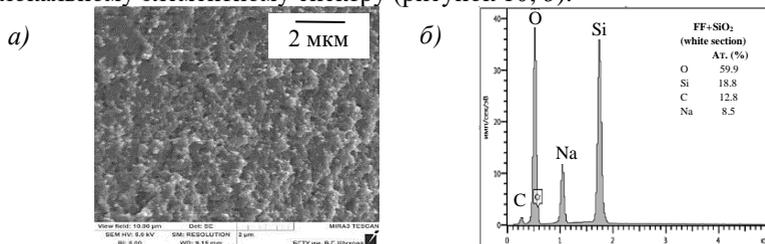
**Рисунок 9** – Зависимость размера частиц  $\text{SiO}_2$  от концентрации индивидуальной добавки и периода созревания

Увеличение концентрации индивидуальной добавки в процессе синтеза нано- $\text{SiO}_2$  от 0,2 до 1,0% стабилизировало рост частиц (частицы медленно увеличиваются в размере). С периодом созревания размер частиц увеличивается в среднем в 2,5 раза (рисунок 9). Установлено, что введение индивидуальной добавки на стадии синтеза частиц, позволяет стабилизировать рост частиц, так как их адсорбция на поверхности

частиц снижает поверхностное натяжение на границе твердое тело-раствор, что способствует уменьшению склонности частиц к агрегации.

**Получение органоминеральной комплексной добавки.** Синтез комплексной добавки ОМКД осуществлялся в три стадии: сначала синтезировали индивидуальную добавку, потом в индивидуальной добавке синтезировали частицы  $\text{SiO}_2$ , после чего на заключительной стадии происходило созревание частиц. Методами УФ- и ИК-спектроскопии установлено, что добавление жидкого стекла на стадии синтеза не влияет на химическую структуру индивидуальной добавки. Размер частиц  $\text{SiO}_2$  в комплексной органоминеральной добавке через 3 сут созревания частиц составлял в среднем около 7 нм.

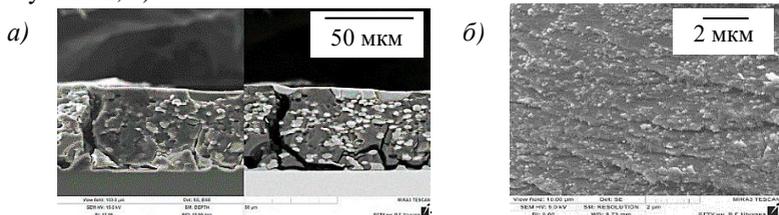
Анализ полученной ОМКД на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) показал, что в добавке наблюдается большое количество белых вкраплений, состоящих из частиц  $\text{SiO}_2$  (рисунок 10, *a*), что подтверждается по локальному элементному спектру (рисунок 10, *б*).



**Рисунок 10** – Микроструктура ОМКД (*a*) и локальный элементный спектр ОМКД, сделанный на СЭМ (*б*)

Таким образом, установлено, что в ОМКД содержатся наноразмерные частицы  $\text{SiO}_2$ , а индивидуальная добавка выполняет две важные функции: стабилизирует рост коллоидных частиц  $\text{SiO}_2$  и решает технологическую проблему равномерного распределения частиц  $\text{SiO}_2$  в комплексной добавке. В результате проделанной работы был получен патент на изобретение № 2806395 «Комплексная добавка для бетонов строительной 3D-печати».

Для сушки ОМКД был опробован эффективный метод сушки индивидуальной добавки в вакууме при температуре  $40^\circ\text{C}$ . Анализ на СЭМ высушенной ОМКД методом сушки в вакууме показал, что в слое комплексной добавки (рисунок 11, *a*) наблюдаются крупные частицы  $\text{SiO}_2$ , которые образовались в процессе сушки из-за медленного испарения влаги. Для предотвращения роста частиц  $\text{SiO}_2$ , комплексную добавку сушили методом распыления добавки в нагретом шкафу до  $60^\circ\text{C}$ . Анализ на сканирующем электронном микроскопе высушенной ОМКД методом распыления показал, что частицы  $\text{SiO}_2$  не укрупнились в процессе сушки и имели малый размер (рисунок 11, *б*).

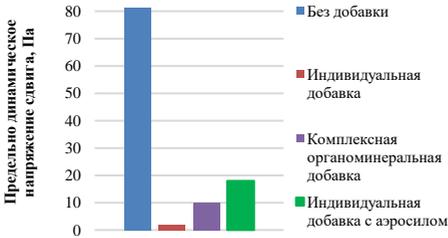


**Рисунок 11** – Микроструктура высушенной ОМКД: *a* – в вакууме при температуре  $40^\circ\text{C}$ ; *б* – в воздухе методом распыления при температуре  $60^\circ\text{C}$

Установлено, что высушивание ОМКД в вакууме не эффективно, вследствие значительного укрупнения частиц  $\text{SiO}_2$ . При сушке комплексной добавки методом распыления значительного роста частиц не происходило,

пластифицирующая способность и активность добавки не изменилась. Таким образом, был разработан эффективный способ обезвоживания ОМКД методом распыления при температуре 60°C.

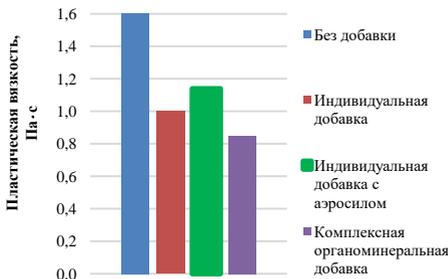
**Исследование влияния добавок на реологические свойства минеральной суспензии** показало (рисунок 12), что предельно динамическое



**Рисунок 12** – Влияние добавок на предельное динамическое напряжение сдвига минеральных смесей

напряжения сдвига цементной смеси с добавлением ОМКД с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией наночастиц SiO<sub>2</sub> 3 мг/мл равно 10 Па. Для сравнения действия синтезированной комплексной добавки с действием комплекса индивидуальных добавок в цементную смесь вводили индивидуальную добавку с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и частицы аэросила с концентрацией 3 мг/мл, предельное динамическое напряжение возросло до 18 Па, при этом смесь становится менее подвижной.

Пластическая вязкость цементной смеси с добавлением ОМКД с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией наночастиц SiO<sub>2</sub> 3 мг/мл, имеет  $\eta_{пл}$  равную 0,9 Па·с (рисунок 13). А при добавлении к цементной смеси индивидуальной добавки с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и частиц аэросила с концентрацией 3 мг/мл,  $\eta_{пл}$  пластическая вязкость также возрастает и составляет 1,1 Па·с.



**Рисунок 13** – Влияние добавок на пластическую вязкость минеральных смесей

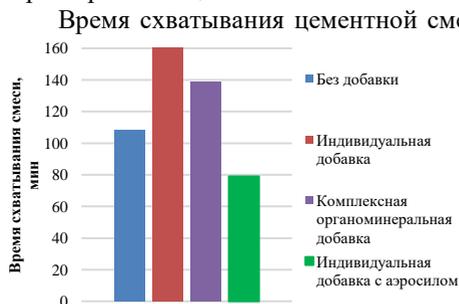
Установлено, что ОМКД снижает предельное динамическое напряжения сдвига цементных смесей на 88% по сравнению со смесями без добавок. Стоит отметить, что в сравнении с индивидуальной добавкой предельное динамическое напряжения сдвига практически не изменяется. Наночастицы SiO<sub>2</sub>, входящие в состав ОМКД, незначительно влияют на реологические свойства системы в начальный период, в отличие от частиц аэросила, которые увеличивают предельное динамическое напряжения сдвига смеси.

**Влияние добавок на структурообразование в высококонцентрированной минеральной суспензии.** Сроки схватывания и время формирования структуры в высококонцентрированных минеральных суспензиях представлены в таблице 2 и на рисунке 14.

**Таблица 2** – Сроки схватывания цементных смесей при постоянном водоцементном отношении с разными добавками

Параметр	Без добавки	Индивидуальная добавка	Комплексная органоминеральная добавка	Индивидуальная добавка с аэросилом
Начало схватывания, через, мин	180	378	350	205
Конец схватывания, через, мин	288	552	489	284

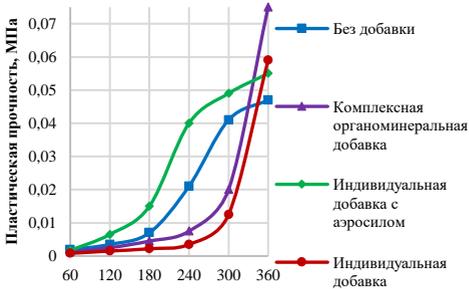
Установлено, что индивидуальная добавка и ОМКД увеличивают индукционный период твердения цементной смеси, что значительно влияет на её структурообразование. В течение этого периода происходит начало гидратации цемента и формирование коагуляционной структуры. Более продолжительный индукционный период способствует формированию более однородной микроструктуры за счет создания новых центров зародышеобразования (в случае ОМКД) и равномерного роста кристаллических фаз. Это повышает тиксотропность смеси и влияет на конечные прочностные характеристики цементного камня.



**Рисунок 14** – Влияние добавок на время схватывания цементных смесей

Исследование влияния добавок на пластическую прочность цементных смесей показало (рисунок 15), что в смесях с индивидуальной добавкой и ОМКД наблюдается увеличение индукционного периода твердения, что коррелируется с данными по срокам схватывания. Установлено, что введение

ОМКД в цементную смесь временно снижает ее пластическую прочность на

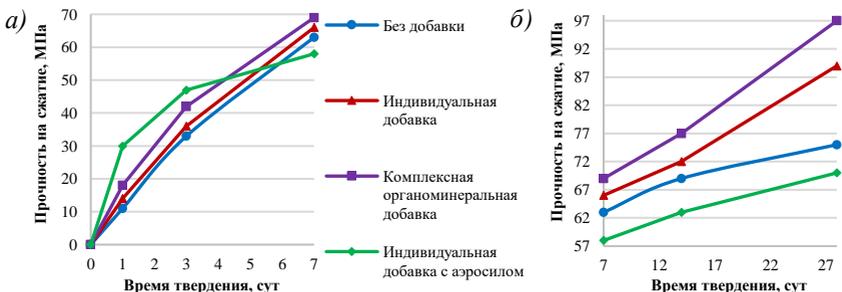


**Рисунок 15** – Кинетика изменения пластической прочности цементных смесей

ранней стадии структурообразования. Это дает возможность сокращения водоцементного отношения смеси, что позволяет регулировать увеличение пластической прочности без утраты необходимой пластичности и формоустойчивости слоя под нагрузкой последующих слоев. Таким образом, исследования показали, что введение ОМКД позволяет регулировать индукционный период твердения с последующей интенсификацией периода ускорения набора прочности.

Влияние добавок на прочность цементного камня. Показано (рисунок 16), что при введении в высококонцентрированную суспензию ОМКД, содержащей 0,2% флороглюцинфурфуrolьного олигомера (по сухому веществу) и 3 мг/мл наночастиц SiO<sub>2</sub>, ранняя прочность цементного камня увеличивается на 29%, а марочная – на 35% по сравнению с контрольным составом без добавки при постоянном водоцементном отношении. А при введении смеси индивидуальной добавки с аэросилом с аналогичными концентрациями компонентов ранняя прочность цементного камня возросла на 114%, а марочная прочность цементного камня при этом снизилась на 7%. Таким образом, ОМКД обеспечивает не только повышение прочности цементного камня, но и стабильность прочностных показателей при длительном твердении.

Показано (рисунок 16), что при введении в высококонцентрированную суспензию ОМКД, содержащей 0,2% флороглюцинфурфуrolьного олигомера (по сухому веществу) и 3 мг/мл наночастиц SiO<sub>2</sub>, ранняя прочность цементного камня увеличивается на 29%, а марочная – на 35% по сравнению с контрольным составом без добавки при постоянном водоцементном отношении. А при введении смеси индивидуальной добавки с аэросилом с аналогичными концентрациями компонентов ранняя прочность цементного камня возросла на 114%, а марочная прочность цементного камня при этом снизилась на 7%. Таким образом, ОМКД обеспечивает не только повышение прочности цементного камня, но и стабильность прочностных показателей при длительном твердении.



**Рисунок 16** – Кинетика набора прочности цементного камня от вводимых добавок в возрасте от 1 до 7 сут (а) и от 7 до 28 сут (б)

Анализ показал, что ОМКД в отличие от индивидуальной добавки и её смеси с аэросилом, обеспечивает повышение ранней и марочной прочности цементного камня. Эффект ОМКД обусловлен коллоидно-химическим

взаимодействием между флороглоцинфурфуrolьным олигомером и наночастицами  $\text{SiO}_2$ , приводящим к интенсификации процессов гидратации и формированию более плотной структуры гидросиликатов кальция, обеспечивающих упрочнение цементной матрицы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Предложено решение научной задачи по получению тиксотропных высококонцентрированных минеральных суспензий с возможностью управления процессами структурообразования для выполнения требований строительной аддитивной технологии путем разработки ОМКД на основе флороглоцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ .

Установлено, что флороглоцин не реагирует с щелочным компонентом и не разлагается при температуре до  $70^\circ\text{C}$ , в то время как фурфурол вступает в реакцию с щелочным компонентом даже при комнатной температуре, образуя побочные продукты. Основными продуктами разложения фурфуrolа являются фуриловый спирт и Na-соль пироглиевой кислоты. Показано, что скорость введения фурфуrolа влияет на химическое равновесие при синтезе добавки, что отражается на пластифицирующей способности олигомера. Определен оптимальный метод введения фурфуrolа способом капельного добавления, за счет которого уменьшается количество побочных продуктов.

Доказано, что примесь Na-соли пироглиевой кислоты с концентрацией более 1% от массы добавки значительно снижает ее пластифицирующую способность и функциональную стабильность. Установлено, что мономеры, использованные в работе, и побочные продукты синтеза, кроме фурилового спирта, не обладают пластифицирующими свойствами, в то время как очищенный фуриловый спирт имеет слабые пластифицирующие свойства.

Разработано лабораторное устройство StarXum 2.0, способное автоматически синтезировать добавки на основе флороглоцинфурфуrolьных олигомеров, позволяющее обеспечивать повышенную точность всех этапов синтеза и исключать возможность систематических ошибок.

Установлено, что метод щелочного гидролиза позволяет получать наноразмерные частицы  $\text{SiO}_2$ . При увеличении концентрации жидкого стекла наблюдается значительное увеличение количества частиц  $\text{SiO}_2$ , что приводит к более быстрой коагуляции и образованию крупных агломератов. Температурное воздействие оказывает влияние на рост агрегатов, что приводит к их оседанию. Доказано, что метод кислотного гидролиза позволяет получать частицы  $\text{SiO}_2$  размером менее 10 нм при оптимальном соотношении растворов реактивов равных 2:1 об/об ( $n\text{Na}_2\text{O} \times n\text{SiO}_2$ : HCl).

Разработан эффективный способ получения ОМКД на основе флороглоцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ , заключающийся в поэтапном синтезе олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  с последующим их созревaniem.

Предложен эффективный способ обезвоживания синтезированной в виде водной дисперсии ОМКД методом распыления при температуре  $60^\circ\text{C}$ ,

благодаря которому не происходит значительного роста частиц  $\text{SiO}_2$  и не изменяется пластифицирующая способность и активность добавки.

Показано, что введение индивидуальной добавки в концентрации от 0,2% до 1,0% на стадии синтеза частиц, позволяет стабилизировать рост частиц (частицы медленно увеличиваются в размере), так как добавка адсорбируется на поверхности частиц, что способствует уменьшению тенденции частиц к агрегации. В 7-ми дневный период созревания размер частиц увеличивался в среднем в 2,5 раза (с 7 нм до 20 нм).

Установлено, что индивидуальная добавка увеличивает абсолютное значение  $\zeta$ -потенциала частиц  $\text{SiO}_2$  с -12 мВ до -48 мВ, тем самым усиливает электростатические силы отталкивания, что приводит к повышению агрегативной устойчивости суспензий. Показано, что при оптимальной концентрации индивидуальной добавки равной 0,2% от массы частиц  $\text{SiO}_2$ , происходит необратимая мономолекулярная адсорбция добавки.

Разработана ОМКД способная снижать предельное динамическое напряжения сдвига цементных смесей на 88%. Установлено, что добавка обладает высокой пластифицирующей и водоредуцирующей способностью в цементных смесях, позволяющая получать пластическую прочность смеси около 0,07 МПа, требуемую для аддитивных технологий. Показано, что добавка способна сокращать срок схватывания смеси почти в 2 раза (начало – на 46%, а конец – на 52%), тем самым обеспечивая баланс между замедлением и развитием прочности смеси.

Установлено, что ОМКД повышает раннюю прочность цементного камня на 29%, а марочную прочность на 35% по сравнению с цементным камнем без добавки вследствие интенсификации процессов гидратации и формирования более плотной и однородной структуры гидросиликатов кальция, обеспечивающих уплотнение цементной матрицы. Показано, что ОМКД на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$  классифицируется как пластифицирующая добавка I группы по ГОСТ 24211-2008.

Разработана технологическая схема полупромышленного и промышленного производства и регламент полупромышленного производства ОМКД на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц  $\text{SiO}_2$ . Технология синтеза успешно апробирована на предприятии ЗАО «Осколцемент» при выпуске опытной партии.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях химической промышленности при производстве химических добавок для строительной индустрии.

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении: расширения спектра сырьевых материалов для синтеза добавок, применяемых в строительной индустрии; изучение влияния комплексной добавки на структурообразование в условиях промышленных объектов.

**СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ,  
В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ  
В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных  
и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ**

1. **Старченко, С.А.** Реологические свойства и структурообразование минеральной суспензии с комплексной органоминеральной добавкой / С.А. Старченко, В.А. Полуэктова, Н.А. Шаповалов, Е.П. Кожанова // Chemical Bulletin. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 48–63. – DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-48-63. (*CA(pt)*).

2. **Старченко, С.А.** Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флороглюцинфурфуrolьного олигомера и наночастиц диоксида кремния / С.А. Старченко, В.А. Полуэктова, Н.А. Шаповалов, Е.П. Кожанова // Нанотехнологии в строительстве. – 2024. – Т. 16, № 5. – С. 447–462. – DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-5-447-462. (*CA(pt)*, *WoS(ESCI)*, *Scopus Q3*).

3. **Полуэктова, В.А.** Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий / В.А. Полуэктова, Н.А. Шаповалов, Н.И. Черкашина, Е.П. Кожанова, **С.А. Старченко** // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 258–266. – DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266. (*CA(pt)*, *WoS(ESCI)*, *Scopus Q3*).

**В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus**

4. **Poluektova, V.A.** Features of the Chemical Interaction of 2-Furaldehyde and 1,3,5-Trihydroxybenzene in an Alkaline Medium to Obtain a Plasticizing Additive / V.A. Poluektova, N.I. Cherkashina, **S.A. Starchenko**, D.S. Romanyuk // ChemEngineering. – 2021. – Vol. 5, № 4. – P. 84. – DOI: 10.3390/chemengineering5040084. (*Scopus Q2*).

5. **Poluektova, V.A.** The use of plant materials for the synthesis of superplasticizer / V.A. Poluektova, N.I. Cherkashina, **S.A. Starchenko** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2124 (1). – Article number 012028. – DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012028. (*Scopus Q4*).

**В сборниках трудов конференций**

6. **Полуэктова, В.А.** Композиционный полимерцементный материал для аддитивных технологий, модифицированный флороглюцинфурфуrolьным олигомером / В.А. Полуэктова, Е.П. Кожанова, **С.А. Старченко** // Знания и научный прогресс: новые подходы и актуальные исследования: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции, Анапа, 24 мая 2023 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2023. – С. 19–24.

7. **Мухачева, В.Д.** Особенности синтеза флороглюцин-фурфуrolьного модификатора / В.Д. Мухачева, **С.А. Старченко** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы конференции, Белгород, 01–20 мая 2017 года. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 1678–1682.

8. *Полуэктова, В.А.* Фундаментальные закономерности влияния состава и строения оксифенольных олигомеров на пластификацию цементных смесей / В.А. Полуэктова, Н.А. Шаповалов, **С.А. Старченко** // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 20–21 апреля 2017 года. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017 – С. 261–268.

9. *Старченко, С.А.* Влияние способа внесения конденсирующего агента при синтезе флороглюцин-фурфурольного модификатора / С.А. Старченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 мая 2021 года. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. – С. 3168–3172.

10. *Старченко, С.А.* Исследование процесса сушки суперпластификатора на основе флороглюцинофурфурольных олигомеров / С.А. Старченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящённая 165-летию В.Г. Шухова: материалы конференции, Белгород, 01–20 мая 2018 года. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 3445–3448.

11. *Старченко, С.А.* Проектирование схемы цепей оборудования по синтезу три-оксифенольного пластификатора СБ-ФФ с использованием валковой дробилки с зубчатой передачей / С.А. Старченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы конференции, Белгород, 01–20 мая 2017 года. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 425–428.

#### *Объекты интеллектуальной собственности*

12. *Пат. 2806395 РФ.* Комплексная добавка для бетонов строительной 3D-печати // В.А. Полуэктова, **С.А. Старченко**, Е.П. Кожанова. Заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2023113979; заявл. 29.05.2023; опубл. 31.10.2023. – 6 с.

13. Ноу-хау № 20170025. Способ получения флороглюцинофурфурольного суперпластификатора // В.А. Полуэктова, Н.А. Шаповалов, **С.А. Старченко**. Заявитель и правообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – 5 с.

14. Ноу-хау № 20170029. Устройство StarXum 2.0 для автоматического синтеза оксифенолфурфурольных суперпластификаторов для бетонов // В.А. Полуэктова, **С.А. Старченко**. Заявитель и правообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – 4 с

**СТАРЧЕНКО СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СУПЕРПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ И СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ФЛОРОГЛЮЦИН-  
ФУРФУРОЛЬНОГО ОЛИГОМЕРА И НАНО-SiO<sub>2</sub>**

1.4.10. Коллоидная химия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 16.10.2025.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ № 117

Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46