

На правах рукописи



ТУЛЯГАНОВ АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ

**СМЕСИ СУХИЕ ЦЕМЕНТНЫЕ НАПОЛЬНЫЕ
С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ильина Лилия Владимировна

Официальные оппоненты: **Бурьянов Александр Федорович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», консультант кафедры «Строительное материаловедение»

Мухаметрахимов Рустем Ханифович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», доцент кафедры «Технология строительного производства»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»**

Защита состоится 3 декабря 2024 года в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.2.510.01 на базе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» по адресу: 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, стр. 113, ауд. 230.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» и на сайте http://www.sibstrin.ru/dissovet/info_o_zachitah/.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Смирнова Ольга
Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное строительство широко использует сухие строительные смеси (ССС). Они характеризуются стабильностью свойств, их применение повышает качество строительных работ, производительность труда, снижает затраты на транспортирование и хранение, уменьшает потери при выполнении работ. Эти и другие показатели выгодно отличают СССР от традиционных смесей, применяемых в строительстве. Разработка и внедрение новых эффективных СССР, обладающих высокими физико-механическими характеристиками, является актуальной задачей строительного материаловедения. Созданная обширная нормативная база внедрения сухих строительных смесей свидетельствует о возрастающем значении развития их производства и применения.

Рецептура отечественных СССР содержит модифицирующие добавки, поставляемые из-за рубежа. В себестоимости отечественных СССР 60 - 80 % приходится на модифицирующие добавки, что удорожает их стоимость и делает их зависимыми от импортных поставок. В связи с этим проблема улучшения технологических свойств растворных смесей и эксплуатационных свойств растворов, а также импортозамещения модифицирующих добавок, расширения номенклатуры цементных СССР с использованием местных и отечественных модифицирующих добавок, является актуальной.

Степень разработанности избранной темы. Улучшением свойств растворов путем введения модифицирующих добавок смешанного действия занимались Боженков П.И., Мешков П.И., Мокин В.А., Новицкий А.Г., Ефремов М.В. и др. Однако возможность управления технологическими и эксплуатационными показателями СССР при введении добавок до конца не изучена. В настоящее время высокоэффективная СССР состоит из отечественных неорганических вяжущих, наполнителей и заполнителей, и, как правило, порошковых многофункциональных полимерных добавок и ретардированного полимера иностранного производства. Сегодня импортозамещение полимерных добавок зарубежного производства на отечественные является первостепенной задачей. В качестве отечественной полимерной добавки возможно использовать эфиры целлюлозы. При этом повышается водоцементное отношение, что снижает прочность при сжатии, изгибе и растяжении, возникает дополнительное воздухововлечение, замедляется схватывание и твердение, что не всегда необходимо. Поэтому целесообразно разработать способы снижения данных негативных факторов.

Многие отечественные ученые внесли значительный вклад в разработку и внедрение в производство сухих строительных смесей, которые обладают повышенными эксплуатационными свойствами, такие как Калашников В.И., Комохов П.Г., Трещев А.А., Шангина Н.Н., Акулова М.В., Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Хозин В.Г., Пустовгар А.П., Рахимбаев Ш.М., Пичугин А.П., Ерофеев В.Т., Козлова В.К. и др., а также ряд зарубежных исследователей. В данной работе предложен состав СССР напольной на основе портландцемента, модифицированной отечественными добавками и техногенными продуктами, с повышенными технологическими свойствами растворной смеси и эксплуатационными свойствами растворов.

Цель исследования - разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение и оптимизацию сухих напольных смесей с улучшенными технологическими свойствами растворных смесей и эксплуатационными свойствами растворов на основе портландцемента путем введения модифицирующих добавок.

Задачи исследования:

- провести анализ воздействия вида и количества алюминий-содержащих добавок (оксид и гидроксид алюминия) на ускорение и упрочнение цементных систем путем изменения фазового состава и микроструктуры цементного камня;
- определить изменения технологических свойств растворных смесей и эксплуатационных свойств раствора от вида и содержания модифицирующих добавок (упрочняющих, армирующих, пластифицирующих, водоредуцирующих и водоудерживающих) в составе сухой смеси напольной (ССН);
- установить механизм формирования структуры цементных систем с использованием модифицирующих добавок;
- разработать технологические решения, обеспечивающие получение ССН на основе портландцемента с улучшенными эксплуатационными характеристиками;
- разработать составы напольных ССС с улучшенными характеристиками и повышенной экономической эффективностью с разработкой нормативно-технической документацией для промышленного производства;
- провести проверку результатов исследования в опытно-промышленных условиях.

Объектом исследования является сухая напольная смесь на основе портландцемента, содержащая модифицирующие добавки и применяемая для устройства напольных выравнивающих покрытий при строительстве, ремонте и реконструкции зданий и сооружений.

Предметом исследования является установление физико-химических закономерностей формирования структуры цементной системы и ее свойств с модифицирующими добавками.

Научная новизна:

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение сухой смеси напольной (ССН), обладающей повышенными технологическими и эксплуатационными характеристиками, заключающееся в предварительном модифицировании портландцемента алюминий-содержащими добавками (оксид и гидроксид алюминия) и добавлении гидратной извести, последующем смешивании вяжущего с предварительно распушенной метилцеллюлозой (МЦ), редиспергируемым полимерным порошком (РПП), волокнистыми добавками и предварительно высушенным заполнителем. Это позволяет получить сухую смесь с более высокими характеристиками (водоудерживающая способность увеличивается на 4,5 %, расслаиваемость снижается на 11 %, прочность при сжатии увеличивается с 20 до 26 МПа, прочности при отрыве от основания – в 2,2 раза, прочность при изгибе – с 3,6 до 4,6 МПа, стойкость к трещинообразованию возрастает на 5 часов).

2. Предложен механизм структурообразования цементных систем на основе модифицированного вяжущего, связанный с рецептурно-технологическими параметрами (технология приготовления модифицированного вяжущего, количество и вид алюминий-содержащей добавки). Модифицирование цемента 1 % гидроксида алюминия приводит к более глубокой его гидратации, ускорению процесса схватывания цементного теста (начало схватывания – на 38 %, конец – на 27 %) и повышению прочности при сжатии цементных систем. Упрочнение обусловлено уплотнением структуры цементной матрицы, снижением общего объема пор в ней на 10,5 %, объема пор диаметром более 15,4 мкм – до 50 % и увеличения объема пор диаметром менее 1,2 мкм на 22 %, при этом основной объем пор (более 44 %) приходится на поры диаметром менее 50 нм.

3. Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических факторов, а именно способа модифицирования вяжущего и изготовления сухой смеси на формирование структуры цементной системы и ее свойства:

- способа модифицирования вяжущего, количества и вида алюминий-содержащей добавки на образование нового кристаллогидрата (гидрогеленита), обуславливающего более глубокую гидратацию системы;

- способа введения и количества МЦ и РПП – на увеличение водоудерживающей способности смеси до 99 % за счет уменьшения содержания свободной воды в композиционной системе вследствие интенсивного набухания полимера в смеси;

- количества РПП – на повышение прочности при отрыве от основания (бетон тяжелый) вследствие перехода адгезионного характера разрушения в адгезионно-когезионный в результате образования полимерных мостиков на границе раствора с основанием и механической анкеровке с основанием;

- количества и вида волокнистых добавок – на повышение прочности при изгибе в 1,9 раза и получения трещиностойкого раствора вследствие химического взаимодействия контактной зоны базальтового волокна и продуктов гидратации цемента, и компонентов с упруго-вязкими свойствами (РПП).

Полученные закономерности позволяют рационализировать технологию производства ССН в соответствии с требуемыми характеристиками.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что:

- расширены теоретические представления о процессах взаимодействия заполнителя, вяжущего и добавок в компонентном составе сухих смесей, о чем свидетельствуют повышенные технологические свойства растворных смесей и эксплуатационные характеристики раствора;

- теоретически обоснована целесообразность и необходимость использования алюминий-содержащих добавок для более глубокой гидратации цемента с образованием новых кристаллогидратов (гидрогеленита);

- научно подтверждена целесообразность применения водоредуцирующих и водоудерживающих (МЦ и РПП) полимерных добавок для улучшения технологических свойств растворных смесей и эксплуатационных свойств растворов;

- предложен научно-обоснованный подход к дисперсному армированию ССН, определено оптимальное количество и вид армирующих волокон.

Практическая значимость работы определена тем, что:

- составлены уравнения регрессии (на основе экспериментальных данных, полученных с использованием многофакторного планирования эксперимента и их математической обработки), с помощью которых возможно моделировать состав ССН в зависимости от требуемых показателей. При этом соотношение «вяжущее : песок» остается неизменным, по объему оно составляет 1:3,2. Количество добавок варьируется в следующих пределах (% мас.): алюминий-содержащая добавка 0,5–1,5 от цемента; гидратная известь 15–25 от цемента; МЦ – 0,2–0,4 от ССН; РПП – 0,3–0,5 от ССН; волокнистые добавки – 0,4–0,8 от ССН;

- определены рецептурные и технологические параметры изготовления ССН (патент на изобретение № 2729634 «Сухая строительная смесь») и получены растворная смесь и раствор, обладающие следующими свойствами: водоудерживающая способность – 99 %, подвижность – 9 см, период сохранения подвижности – 6 ч, расслаиваемость – 0,1 %. Раствор, полученный из такой смеси будет иметь: прочность при сжатии – 26 МПа, прочность при изгибе – 4,6 МПа, прочность при отрыве от бетонного основания – 1,6 МПа, стойкость к образованию трещин – 5 ч, время начала хождения – 24 часа;

- разработаны компонентные составы смесей сухих напольных подвижностью 10-18 см, класса по прочности при растяжении при изгибе Вtb1,6 - Вtb3,2, классов по прочности при сжатии В5 - В20, прочности сцепления с основанием 0,8 - 1,6 МПа, марки по морозостойкости F75;

- разработаны нормативные и технологические документы на ССН на цементном вяжущем, выпущена опытная партия сухой смеси и выполнены работы по устройству стяжки. Определены технико-экономические показатели производства ССН.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования стали результаты фундаментальных и прикладных научных исследований в области ССС; современные представления о структуре и свойствах строительных материалов; теоретические и технологические основы повышения эксплуатационных свойств; методы их оценки. Методическую основу диссертационной работы составляют методы количественной и качественной обработки получаемых данных, физико-химические и физико-механические методы, методы оптической микроскопии, комплексного термического анализа, рентгенофазового анализа, ртутной порометрии.

Информационной базой исследования являлись монографии, статьи в периодических изданиях, материалы научных конференций, действующие нормативные документы.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и практическое подтверждение возможности получения ССН с повышенными технологическими и эксплуатационными характеристиками путем использования модифицирующих добавок (гидроксид алюминия, гидратная известь, МЦ, РПП, базальтовые волокна);

- особенность и эффективность структурообразования цементных смесей с различными видом и концентрацией алюминий-содержащих добавок на разных сроках твердения;

- особенности влияния количества вводимых пластифицирующих (гидратная известь), водоудерживающих и водоредуцирующих добавок (МЦ,

РПП), вида и количества волокнистых добавок на технологические свойства растворной смеси и эксплуатационные свойства растворов;

- технологическое решение производства ССН, заключающееся в предварительном модифицировании цемента алюминий-содержащими добавками (оксид и гидроксид алюминия) и добавлением гидратной извести, последующем смешивании вяжущего с предварительно распушенной МЦ, РПП, волокнистыми добавками и предварительно высушенным заполнителем;
- результаты апробации ССН, модифицированных отечественными добавками с расчетом экономической эффективности предложенных решений.

Достоверность результатов научной работы обеспечивается проведением исследований в аккредитованной лаборатории, статистической обработкой результатов экспериментальных исследований, сопоставлением результатов экспериментов с производственным апробированием и их взаимной корреляцией. Выводы из лабораторных данных подтверждены положительными результатами опытно-промышленных испытаний ССН.

Внедрение результатов исследований. По результатам работы разработаны составы ССН и технология их изготовления, которые прошли промышленную апробацию в ООО «Авангард» (г. Новосибирск), выпущена опытная партия ССН из которых выполнена стяжка при производстве отделочных работ ООО «СтройтехТСК». Разработаны и утверждены нормативные и технологические документы на предложенные ССН и процессы при их изготовлении. Ряд положений диссертационного исследования использованы в учебном процессе при подготовке обучающихся по направлению «Строительство» на кафедре СМСС ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)».

Апробация работы. Результаты работы доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях: научных конференциях по проблемам архитектуры и строительства (г. Новосибирск: НГАСУ, НГАУ 2005-2009 г. и 2018-2024 г.), Международной научно-практической конференции «Строительство-2017», Ростов-на-Дону, 2017 г.; Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век - 2018» Юго-Зап. гос. ун-т., Курск, 2018 г.; VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)» (г. Новосибирск, 2018 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Качество. Технологии. Инновации», НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск, 2019 - 2024 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 20 работах, включая 7 публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в изданиях, цитируемых в международных базах Web of Science и Scopus, защищены патентом на изобретение РФ.

Личный вклад автора состоит в обосновании научной гипотезы и создании для нее теоретической базы; постановке цели и задач исследования, в теоретическом анализе данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов, анализе и обобщении результатов исследований, формулировке выводов, положений прикладных решений и разработок, проведении апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 185 наименований, содержит 154 страниц основного текста, включая 51 таблицу и 41 рисунок и 4 приложения.

Область исследования специальности 2.1.5: п. 1, 9, 15 паспорта научной специальности 2.1.5 «Строительные материалы и изделия».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, поставлена цель работы, определены задачи исследований, сформулированы научная гипотеза, отмечено практическое значение, теоретическое обоснование и направление реализации научных результатов при получении ССС.

Первая глава посвящена аналитическому обзору по теме исследования. Освещено совершенствование рецептуры и технологии растворов, эксплуатирующихся в сложных условиях, то есть растворов, которые при необходимости должны иметь высокую адгезию, низкое водопоглощение, высокий водоотталкивающий эффект, износостойкость, трещиностойкость, стойкость к ударным нагрузкам, низкую усадку. Обеспечение этих требований возможно введением в ССС модифицирующих добавок. Существенный вклад в исследование проблем, связанных с созданием ССС, покрытия на основе которых обладают повышенными эксплуатационными свойствами, внесли отечественные ученые Комохов П.Г., Калашников В.И., Шангина Н.Н., Трещев А.А., Акулова М.В., Лесовик В.С., Хозин В.Г., Загороднюк Л.Х., Пустовгар А.П., Рахимбаев Ш.М., Ерофеев В.Т., Урханова Л.А. Пичугин А.П. и др., а также ряд зарубежных исследователей. В их работах сформулированы основы создания рецептуры ССС, выбора компонентов, топологии структуры. Однако до сих пор получение сухих напольных смесей на основе портландцемента с модифицирующими отечественными добавками изучено недостаточно. В связи с этим, **научной гипотезой** стало предположение о том, что возможность устройства напольных слоев может быть обеспечена за счет регулирования технологических свойств растворных смесей (водоудерживающей способности, расслаиваемости и сохранения подвижности смеси в течение времени), обеспечивающихся водоудерживающими и стабилизирующими добавками, и эксплуатационных свойств растворов (прочности при сжатии, при изгибе и при отрыве от основания и трещиностойкости), обеспечивающихся полимерными и минеральными (дисперсными и волокнистыми) добавками.

Во второй главе представлены характеристики сырьевых материалов, методики и методологии исследований. В качестве вяжущего применен портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (АО «Искитимцемент», НСО). Его минералогический состав: $C_3S-60,0$; $C_2S-16,0$; $C_3A-7,3$; $C_4AF-14,0$; $CaO_{своб}-0,15$. Химический состав представлен в таблице 1. В качестве алюминий-содержащих добавок в работе использованы оксид и гидроксид алюминия ($\gamma-Al_2O_3$ и $Al(OH)_3$) производства АО «Микроинтек» (табл. 2).

Таблица 1 – Химический состав портландцемента, % мас.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	п.п.п.
20,7	6,3	4,6	65,4	1,3	0,4	0,5

Таблица 2 – Химический состав алюминий-содержащих добавок, % мас.

	$Al(OH)_3$	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	$Na_2O + K_2O$ в пересчете на Na_2O	П.п.п. 800°C в течение 60 мин
$Al(OH)_3$	99,5	-	0,035	0,030	0,4	34,5
$\gamma-Al_2O_3$	-	73÷74	0,015	0,030	0,35 ÷ 0,40	25,0

В качестве заполнителя использовался песок ОАО «Камнереченский каменный карьер». В качестве микроармирующих добавок применялись:

- полиакрилонитриловые волокна Rіsem, которые имели бобовидную форму поперечного сечения и очень шероховатую поверхность, площадь сечения 530 мкм²;

- целлюлозные волокна TECHNOCEL, изготовлены из технической целлюлозы, в основе которой лежит переработанная древесина. Длина волокон - 500 мкм, диаметр волокон – 25 мкм, плотность 1300 кг/м³;

- базальтовая фибра из базальта Аргаяшского месторождения. Плотность волокна 2600 кг/м³, длина волокна - 10 мм, диаметр – 20 мкм.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась гидратная известь (ОАО «Искитимизвесть», НСО), содержащая активных СаО и MgO 70 мас.%; водорастворимых и водонабухаемых порошковых полимеров в работе применялись: редиспергируемый в воде порошок на основе сополимера винилацетата и винилового эфира версатиковой кислоты – производитель ООО «Кубань полимер» и метилцеллюлоза (МЦ-С) производства ООО «Усольехимпром» (Иркутская область) представляющая собой метиловый эфир целлюлозы. Длина волокна 0,2-25,0 мм; толщина волокна - 8-13 мкм.

Исследование характеристик сырьевых материалов, сухой и растворной смеси и раствора проводилось с использованием стандартных методов исследования строительных материалов. При изучении структуры и свойств цементного камня использованы рентгенофазовый, комплексный термический анализы и ртутная порометрия.

Третья глава содержит результаты исследований влияния добавок на технологические свойства растворной смеси и эксплуатационные свойства растворов.

Вследствие большой удельной поверхности частичек гидратной извести с увеличением ее содержания до 30 % водоудерживающая способность растворной смеси увеличивается до 84 %, расслаиваемость при этом снижается до 1 %. Растворная смесь, содержащая гидратную известь, имеет большую подвижность и более длительный период ее сохранения (до 5 часов). Однако водостойкость и прочность раствора снижаются (до 77,4 %).

Оптимальная дозировка алюминий-содержащей добавки с точки зрения обеспечения максимальной прочности искусственного камня составляет 1 % мас (рис. 1), для ускорения процесса гидратации – 1,5 % (табл. 3).

Таблица 3 – Влияние добавок на сроки схватывания цементного теста

Содержание добавки, %	Сроки схватывания цементного теста, мин, при введении			
	Al(OH) ₃		γ-Al ₂ O ₃	
	начало	конец	начало	конец
0	152	299	152	299
0,5	122	250	140	280
1,0	110	235	116	250
1,5	80	210	86	226

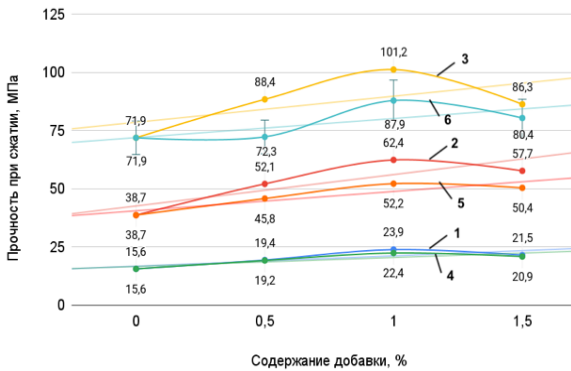


Рисунок 1 – Влияние количества добавки $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ на прочность при сжатии цементного камня: 1 - $\text{Al}(\text{OH})_3$ через 1 суток; 2 - $\text{Al}(\text{OH})_3$ через 3 суток; 3 - $\text{Al}(\text{OH})_3$ через 28 суток; 4 - $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ через 1 суток; 5 - $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ через 3 суток; 6 - $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ через 28 суток

Наибольший упрочняющий и ускоряющий эффект выявлен при введении $\text{Al}(\text{OH})_3$. Водопотребность цемента при введении алюминий-содержащих добавок не изменяется, процесс схватывания ускоряется (начало схватывания – на 38 %, конец – на 27 %). Результаты рентгенофазового анализа показывают, что более глубокая гидратация цемента проявляется при введении алюминий-содержащей добавки (рис. 2).

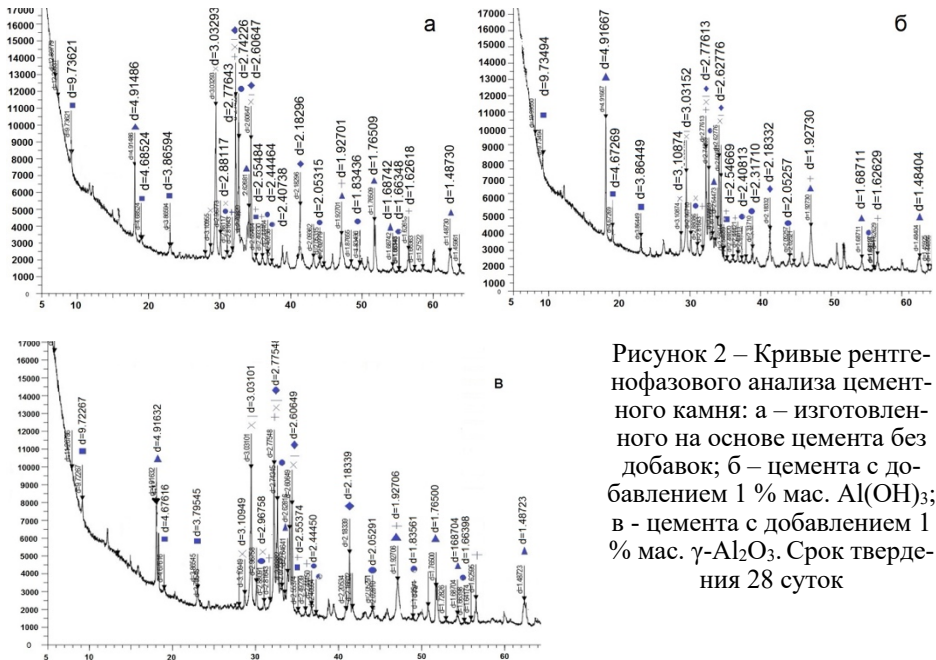


Рисунок 2 – Кривые рентгенофазового анализа цементного камня: а – изготовленного на основе цемента без добавок; б – цемента с добавлением 1 % мас. $\text{Al}(\text{OH})_3$; в – цемента с добавлением 1 % мас. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Срок твердения 28 суток

▲ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$; ■ - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$; ● - $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; + - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$; x - C-S-H(I); — - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; ◆ - $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; * - $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

При введении $\text{Al}(\text{OH})_3$ существенное различие в структуре цементного камня отмечается в содержании пор диаметром более 15,4 мкм и менее 1,2 мкм. Процентное содержание и объем пор диаметром более 15,4 мкм у модифицированного цементного камня уменьшается; общий объем пор диаметром менее 1,2 мкм и соответственно процентное содержание возрастают, при этом основной объем пор (более 44 %) приходится на поры диаметром менее 50 нм (табл. 4). Введение $\text{Al}(\text{OH})_3$ увеличивает водостойкость раствора. Добавление 1 % $\text{Al}(\text{OH})_3$ позволяет получить водостойкий раствор, содержащий 25 % гидратной извести.

Таблица 4 – Характеристика пористости цементного камня

Средний диаметр пор, мкм	Состав вяжущего вещества			
	портландцемент		портландцемент и 1% мас. $\text{Al}(\text{OH})_3$	
	объем пор, мл/г	содержание пор, %	объем пор, мл/г	содержание пор, %
15,4 -361,0	0,1470	45,2	0,0736	25,3
1,2 – 15,4	0,0164	5,0	0,0178	6,1
0,15 – 1,2	0,0313	9,6	0,0346	11,9
0,05- 0,15	0,0353	10,9	0,0367	12,6
0,003 – 0,05	0,0951	29,3	0,1284	44,1
итого	0,3251	100,0	0,2911	100,0

С увеличением дисперсности метилцеллюлозы до удельной поверхности 400 кг/м² продолжительность ее растворения сокращается с 50 минут до 12 минут в нейтральной среде и до 6 минут в щелочной среде (табл. 5).

Таблица 5 – Влияние содержания МЦ в растворяющей смеси на ее растворимость

Содержание МЦ, % мас.	Продолжительность растворения, мин	
	нейтральная среда (pH=6-7)	щелочная среда (pH=10-12)
0,2	12	6
0,3	18	9
0,4	24	12

Введение в хрупкий каркас цементно-песчаной матрицы добавок с упруго-вязкими свойствами приводит к увеличению прочности при изгибе и при отрыве раствора от основания. Наибольшее упрочнение достигается при введении 0,4 % РПП (рис.3). Увеличение прочности при отрыве от основания объясняется более глубоким (на 12 %) проникновением модифицирующей смеси в основание.

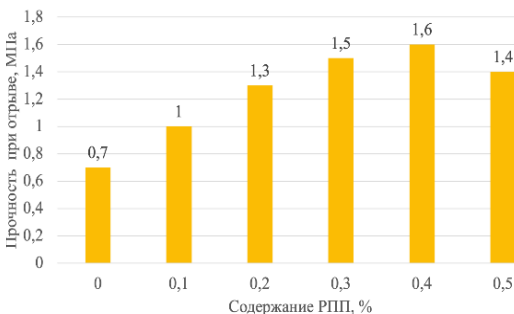


Рисунок 3 – Влияние количества РПП на прочность при отрыве от бетонного основания

Вследствие разветвленных макромолекул метилцеллюлозы, способствующих образованию плотных экранирующих полимерных гидратных оболочек вокруг частиц цемента, замедляющих диффузию воды к поверхности частиц цемента и препятствующих росту цемент-

ных новообразований с увеличением содержания МЦ процесс схватывания цемента замедляется, что продлевает сохранение первоначальной подвижности (табл. 6). Для регулирования водоудерживающей способности смеси исследовалось влияние водоудерживающих добавок (гидратная известь, МЦ, РПП) (табл. 7). При этом количество гидратной извести составляло 25 % мас. от портландцемента.

Таблица 6 – Влияние содержания МЦ в смеси на сроки схватывания

Содержание МЦ, % мас.	Сроки схватывания, ч-мин	
	начало схватывания	конец схватывания
0	2-39	5-05
0,2	3-15	5-30
0,3	3-50	6-10
0,4	4-30	6-40

Таблица 7 – Влияние содержания гидратной извести в цементно-известковом вяжущем и количества МЦ на водоудерживающую способность смеси

Содержание РПП, % мас.	Водоудерживающая способность растворной смеси, %, в зависимости от количества метилцеллюлозы, % мас.			
	0	0,2	0,3	0,4
0	65,0	91,8	95,3	96,4
0,2	75,6	95,0	96,5	97,3
0,3	80,0	96,5	97,6	98,7
0,4	87,1	97,5	98,4	99,1
0,5	94,0	98,3	99,1	99,3

Введение РПП увеличивает стойкость к образованию трещин. При добавлении 0,2 % РПП через 1 сутки твердения трещины в слое раствора толщиной 20 мм не обнаружены. Наибольшей стойкостью к образованию трещин обладает смесь, содержащая 0,4–0,5 % РПП (табл. 8). Трещины в такой смеси не обнаружены через 3 суток твердения.

Таблица 8 – Влияние количества РПП на стойкость к образованию трещин

Продолжительность твердения, сутки	Глубина раскрытия трещин, мм, при количестве РПП, % мас.					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
2	0,6	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
3	0,8	0,6	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют

Введение волокнистых добавок увеличивает прочность при изгибе. Наибольшее увеличение прочности и трещиностойкости (рис. 4) достигнуто при введении базальтовых волокон. Оптимальное их содержание (0,6 %) обеспечивает трещиностойкость в слое раствора 20 мм уже через сутки твердения. Прочность при изгибе при этом увеличивается на 21 % по сравнению с составом без волокон и в 1,9 раза по отношению к составу без волокон и РПП.

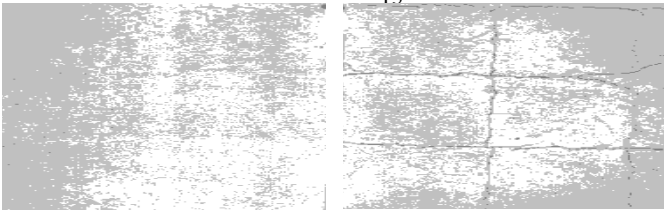


Рисунок 4 – Поверхность раствора после испытания на стойкость к трещинообразованию: с базальтовым волокном (слева) и без него (справа)

В четвертой главе приведены результаты оптимизации рецептов ССН на основе портландцемента с модифицирующими добавками путем многофакторного планирования эксперимента (табл. 9).

Таблица 9 – Значения факторов варьирования

Наименование фактора	Условное обозначение	Уровень варьирования	
		-1	+1
Количество РПП, % мас.	X_1	0,3	0,5
Количество гидратной извести, % мас	X_2	15	25
Количество метилцеллюлозы, % мас.	X_3	0,2	0,4
Количество волокон, % мас.	X_4	0,4	0,8

Для оценки свойств приготавливалась смесь следующего состава на 1м^3 , кг: вяжущее вещество – 313, песок – 1400, вода – 180. Так как алюминий-содержащая добавка наибольшее влияние оказывает на прочность при сжатии и на сроки схватывания, то на основании ранее проведенных исследований принята ее оптимальное количество, 1 % от массы цемента.

Получены уравнения регрессии (1–7), с помощью которых можно моделировать состав ССН в зависимости от требуемых показателей. При этом соотношение «вяжущее: песок» оставалось неизменным, по объему оно составляет 1:3,2. Количество добавок варьировалось в соответствии с таблицей 9.

Для водоудерживающей способности получено уравнение:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 88,625 + 6,875x_1 + 0,222x_2 + 4,625x_3, \quad (1)$$

для подвижности:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 5,187 - 1,25x_1 + 0,413x_2 - 9,375x_3 - 2,5x_4, \quad (2)$$

для сохраняемости первоначальной подвижности:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1,5 + 0,075x_2 + 6,25x_3, \quad (3)$$

для расслаиваемости:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 8,3 - 2,5x_1 - 0,195x_2 - 5x_3 - 0,188x_4, \quad (4)$$

для прочности при изгибе:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 5,075 + 0,75x_1 - 0,025x_2 - 1,5x_3 + 0,5x_4, \quad (5)$$

для прочности сцепления при отрыве от основания:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1,15 + x_1 - 0,01x_2 + 0,5x_3 - 3,35 \cdot 10^{-15} x_4, \quad (6)$$

для трещиностойкости:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,625 + 2,5x_1 + 0,025x_2 + 1,25x_3 + 2,5x_4. \quad (7)$$

Для определения качества предложенных моделей для каждого уравнения (1)–(7) были вычислены множественный коэффициент детерминации R^2 и приведенный коэффициент детерминации $\hat{R}^2$.

Зависимость подвижности растворной смеси от факторов варьирования приведена на рисунке 5. На рис.6 представлены графики поверхности (а) и график изолиний (б) для уравнения (3). Значения добавок приведены в нормированном виде, где «0» соответствует минимальному количеству добавки, «1» - максимальному количеству.

Основное влияние на сохранение первоначальной подвижности оказывает МЦ, в меньшей степени – добавка гидратной извести. Волокно и РПП не оказывают влияние на сохранение первоначальной подвижности. Из уравнения (1) видно, что добавка микроармирующих волокон не влияет на водоудерживающую способность растворной смеси

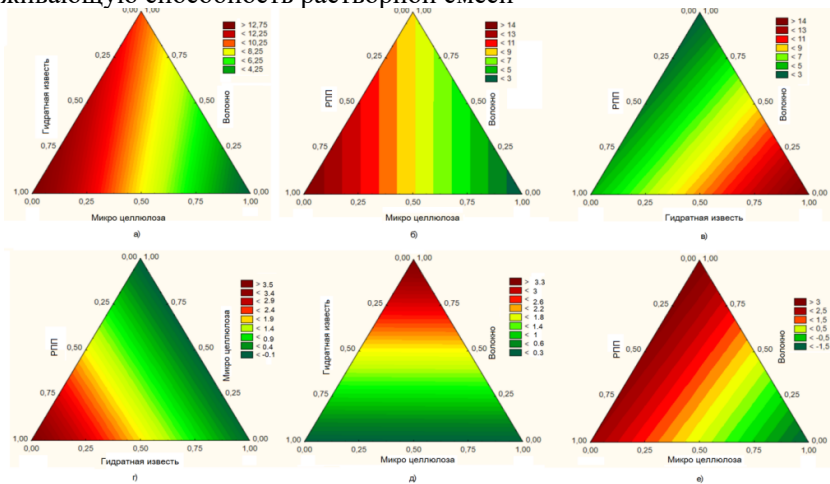


Рисунок 5 – Изменение подвижности при фиксированном количестве РПП (а), гидратной извести (б), МЦ (в); изменение расслаиваемости при фиксированном количестве волокна (г), РПП (д), МЦ (е)

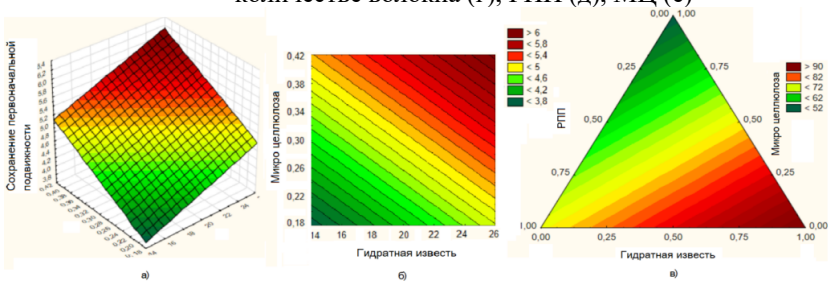


Рисунок 6 – Графики зависимости сохранения первоначальной подвижности от величины добавок гидратной извести и МЦ (а, б) и зависимости водоудерживающей способности от величины РПП, гидратной извести и МЦ (в)

Зависимость прочности раствора от факторов варьирования приведена на рисунке 7. Поскольку уравнения (2) и (4) демонстрируют зависимость подвижности и расслаиваемости растворной смеси от четырех факторов, то для построения графиков поверхности отклика одним из варьируемых факторов задавалось постоянное значение (среднее), а по трем другим строился график. Для построения тернарных графиков использовался математический пакет

STATIS-TICA. Таким образом, оценивая полученные графики, были выбраны девять, которые наглядно описывают зависимость подвижности и расслаиваемости от содержания компонентов сухой смеси: РПП, гидратной извести, МЦ и волокнистых добавок.

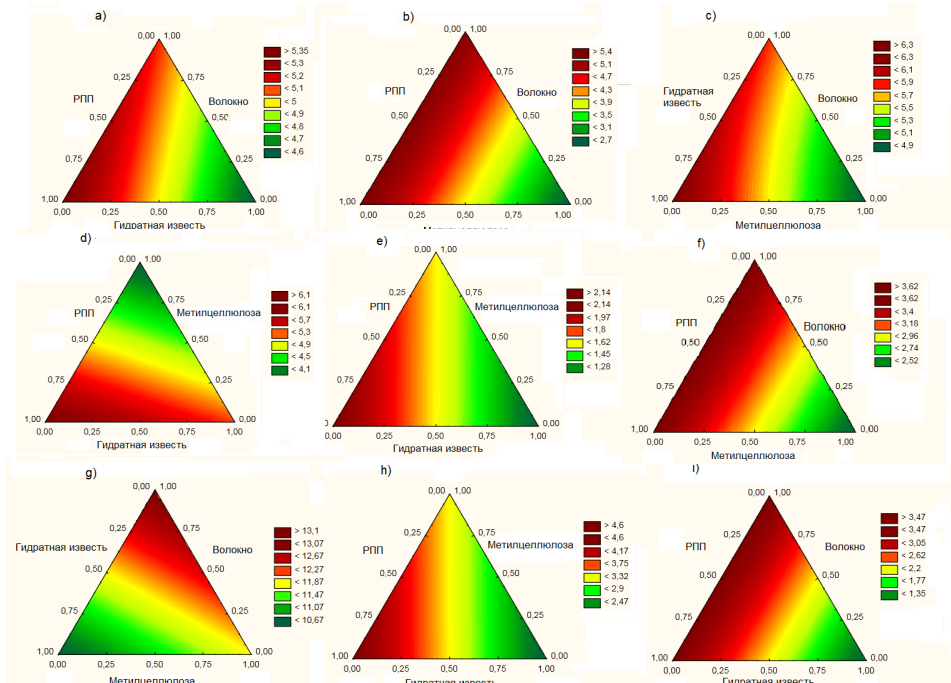


Рисунок 7 – Графики влияния факторов варьирования на свойства раствора:

- прочности на изгиб при фиксированной доле: а) метилцеллюлозы 0,3 %; б) гидратной извести 20 %; в) волокна 0,6 %; д) РПП 0,4 %;
- е) прочности на растяжение;
- трещиностойкости при фиксированной доле: ф) гидратной извести 20 %; г) РПП 0,4%; х) волокна 0,6%; и) метилцеллюлозы 0,3%

Одним из условий высокой эксплуатационной стойкости растворов является морозостойкость. Для исследований использовали раствор, полученный из ССН (табл. 10).

Таблица 10 – Изменение свойств образцов при испытании на морозостойкость (в процентах от исходного значения)

Наименование смеси	Изменение прочности после испытаний в зависимости от числа циклов, %			Изменение массы после испытаний в зависимости от числа циклов, %			Марка по морозостойкости
	8	13	20	8	13	20	
ССН	- 7,7	- 16,9	- 26,9	+ 1,1	+ 1,3	+ 1,7	F75

Разработанная ССН на основе местного сырья и полимерных добавок отечественного производства конкурентоспособна. Сухая смесь по своим физико-ме-

ханическим характеристикам не уступает зарубежным аналогам. На основе полученного оптимального состава разработана технологическая схема производства сухой смеси (рис. 8) и стандарт предприятия.



Рисунок 8 – Технологическая схема производства сухой напольной смеси

Пятая глава. Представленные результаты исследований по улучшению технологических свойств растворяемых смесей и эксплуатационных свойств растворов позволили организовать в 2023 году производство ССН в ООО «Авангард» (акты представлены в работе) и выполнить стяжки напольными смесями в ООО «СтройтехТСК».

Результаты данной диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлению «Строительство».

Экономический эффект от использования разработанных рекомендаций достигается за счет улучшения свойств растворов и составляет (в ценах на 01.01.2023) 871 руб. на 1 т сухой смеси.

ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленные в работе задачи выполнены, цель достигнута.

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение сухой смеси напольной (ССН), обладающей повышенными технологическими и эксплуатационными характеристиками, заключающееся в предварительном модифицировании портландцемента алюминий-содержащими добавками (оксид и гидроксид алюминия) и добавлении гидратной извести, последующем смешивании вяжущего с предварительно распушенной метилцеллюлозой (МЦ), редиспергируемым полимерным порошком (РПП), волокнистыми добавками и предварительно высушенным наполнителем. Это позволяет получить сухую смесь с более высокими характеристиками (водоудерживающая способность увеличивается на 4,5 %, расслаиваемость снижается на 11 %, прочность при сжатии увеличивается с 20 до 26 МПа, прочности при отрыве от основания – в 2,2 раза, прочность при изгибе – с 3,6 до 4,6 МПа, стойкость к трещинообразованию возрастает на 5 часов).

2. Предложен механизм структурообразования цементных систем на основе модифицированного вяжущего, связанный с рецептурно-технологическими параметрами (технология приготовления модифицированного вяжущего, количество и вид алюминий-содержащей добавки). Модифицирование цемента 1 % гидроксида алюминия приводит к более глубокой его гидратации, ускорению процесса схватывания цементного теста (начало схватывания – на 38 %, конец – на 27 %) и повышению прочности при сжатии цементных систем. Упрочнение обусловлено уплотнением структуры цементной матрицы, снижением общего объема пор в ней на 10,5 %, объема пор диаметром более 15,4 мкм – до 50 % и увеличения объема пор диаметром менее 1,2 мкм на 22 %, при этом основной объем пор (более 44 %) приходится на поры диаметром менее 50 нм.

3. Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических факторов, а именно способа модифицирования вяжущего и изготовления сухой смеси на формирование структуры цементной системы и ее свойства:

- способа модифицирования вяжущего, количества и вида алюминий-содержащей добавки на образование нового кристаллогидрата (гидрогеленита), обуславливающего более глубокую гидратацию системы;

- способа введения и количества МЦ и РПП – на увеличение водоудерживающей способности смеси до 99 % за счет уменьшения содержания свободной воды в композиционной системе вследствие интенсивного набухания полимера в смеси;

- количества РПП – на повышение прочности при отрыве от основания (бетон тяжелый) вследствие перехода адгезионного характера разрушения в адгезионно-когезионный в следствии образования полимерных мостиков на границе раствора с основанием и механической анкеровке с основанием;

- количества и вида волокнистых добавок – на повышение прочности при изгибе в 1,9 раза и получения трещиностойкого раствора вследствие химического взаимодействия контактной зоны базальтового волокна и продуктов гидратации цемента, и компонентов с упруго-вязкими свойствами (РПП).

Полученные закономерности позволяют рационализировать технологию производства ССН в соответствии с требуемыми характеристиками.

4. Дополнены теоретические представления о процессах взаимодействия заполнителя, вяжущего и добавок в компонентном составе сухих смесей, о чем свидетельствуют повышенные технологические свойства растворных смесей и эксплуатационные характеристики раствора;

5. Теоретически обоснована целесообразность и необходимость использования алюминий-содержащих добавок для более глубокой гидратации цемента с образованием новых кристаллогидратов (гидрогеленита);

6. Научно подтверждена целесообразность применения водоредуцирующих и водоудерживающих (МЦ и РПП) полимерных добавок для улучшения технологических свойств растворных смесей и эксплуатационных свойств растворов;

7. Предложен научно-обоснованный подход к дисперсному армированию ССН, определено оптимальное количество и вид армирующих волокон.

8. Составлены уравнения регрессии (на основе экспериментальных данных, полученных с использованием многофакторного планирования экспери-

мента и их математической обработки), с помощью которых возможно моделировать состав ССН в зависимости от требуемых показателей. При этом соотношение «вяжущее : песок» остается неизменным, по объему оно составляет 1:3,2. Количество добавок варьируется в следующих пределах (% мас.): алюминий-содержащая добавка 0,5–1,5 от цемента; гидратная известь 15–25 от цемента; МЦ – 0,2–0,4 от ССН; РПП – 0,3–0,5 от ССН; волокнистые добавки – 0,4–0,8 от ССН;

9. Определены рецептурные и технологические параметры изготовления ССН (патент на изобретение № 2729634 «Сухая строительная смесь») и получены растворная смесь и раствор, обладающие следующими свойствами: водоудерживающая способность – 99 %, подвижность – 9 см, период сохранения подвижности – 6 ч, расслаиваемость – 0,1 %. Раствор, полученный из такой смеси будет иметь: прочность при сжатии – 26 МПа, прочность при изгибе – 4,6 МПа, прочность при отрыве от бетонного основания – 1,6 МПа, стойкость к образованию трещин – 5 ч, время начала хождения – 24 часа;

10. Разработаны компонентные составы смесей сухих напольных подвижностью 10-18 см, класса по прочности при растяжении при изгибе В_т1,6 - В_т3,2, классов по прочности при сжатии В5 - В20, прочности сцепления с основанием 0,8 - 1,6 МПа, марки по морозостойкости F75;

11. Разработаны нормативные и технологические документы на ССН на цементном вяжущем, выпущена опытная партия сухой смеси и выполнены работы по устройству стяжки. Определены технико-экономические показатели производства ССН.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшее совершенствование рецептуры путем модификации наноматериалами различной химической природы с целью повышения физико-механических характеристик и экономического эффекта применения сухих напольных смесей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в журналах, входящих в базы SCOPUS и Web of Science:

1. Ilina L.V., Tulyaganov A.K., Mukhina I.N. Optimal dry mixes simulating // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020 - Number 2" 2020. С. 022021.

2. Ilina L.V., Tulyaganov A.K., Gichko N.O., Teplov A.N. The structure of hardened cement paste changing due to mineral admixtures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018. – С. 012043.

3. Ilina L.V., Tulyaganov A.K. Effect of dispersed mineral additive on properties of mortar mixture and solution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. – С. 012031.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Ильина Л.В., Влияние оксида и гидроксидов алюминия на свойство цементного теста и камня / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, **А.К. Туляганов**, Т.Н. Черных // Эксперт: Теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 62-67.

2. Ильина Л.В., Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия / Л.В. Ильина, В.В. Молодин, Н.О. Гичко, **А.К. Туляганов** // Строительные материалы. 2023. № 7. С. 36–42.

3. Ильина Л.В., Гичко Н.О., **Туляганов А.К.**, Упрочнение цемента путем ввода тонкодисперсных минеральных добавок // Цемент и его применение. – 2022. № 3. – С. 52-55.

4. Ильина Л.В., Кудяков А.И., **Туляганов А.К.** Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. № 12 (732). – С. 32-43.

5. Ильина Л.В., Гичко Н.О., Теплов А.Н., **Туляганов А.К.** Изменение структуры и пористости цементного камня при введении дисперсного известняка // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. № 9 (705). – С. 41-49.

6. **Туляганов А.К.**, Безбородов В.А. Сухие штукатурные композиции на цементной основе, армированные базальтовыми волокнами // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. № 5 (641). – С. 48-51.

7. Безбородов В.А., **Туляганов А.К.**, Пичугин А.П. Влияние наполнителей и добавок на свойства сухих цементных строительных смесей // Строительные материалы. – 2011. № 6. – С. 70-71.

8. Патент на изобретение РФ 2729634. Сухая строительная смесь / **А.К. Туляганов**, Л.В. Ильина, Ю.В. Сидоркович / заявл. 04.06.2018; опубл. 11.08.2020

Публикации в других научных изданиях:

1. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.**, Штукатурные цементные смеси повышенной трещиностойкости // В сборнике: Качество. Технологии. Инновации. Материалы V Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 4-10

2. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.**, Литвинов М.Е. Влияние кремнезоля на прочность цементных растворов. // В сборнике: Качество. Технологии. Инновации. Материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 81-85

3. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.**, Видаев М.В. Влияние количества загрязняющих примесей в песке на прочность раствора // В сборнике: Качество. Технологии. Инновации. Материалы III Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 3-6

4. Лыткина Е.В., **Туляганов А.К.**, Шипулин А.С. Технология получения высокопрочных бетонов с минеральными добавками // В сборнике: Качество. Технологии. Инновации. Материалы III Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 37-39

5. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.**, Видаев М.В. Влияние крупности песка на прочность раствора // В сборнике: Качество. Технологии. Инновации. Материалы III Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 160-163

6. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.**, Гичко Н.О., Теплов А.Н. Изменение структуры цементного камня при введении минеральной добавки // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018) программа и тезисы докладов. – 2018. – С. 200.

7. Ильина Л.В., Соловьева О.Н., **Туляганов А.К.**, Теплов А.Н. Влияние качества песка на прочность раствора // В сборнике: Молодежь и XXI век. Материалы VIII Международной молодежной научной конференции: в 5 томах. – 2018. – С. 280-285.

8. Ильина Л.В., Гичко Н.О., Теплов А.Н., **Туляганов А.К.** Изменение пористости цементного камня при введении известняка // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2018. № 9. – С. 155-160.

9. Ильина Л.В., **Туляганов А.К.** Влияние крупности песка на прочность раствора // Технические науки в мире: от теории к практике сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 52-54.

10. **Туляганов А.К.**, Парикова Е.В. Отделочные композиции для фасадов зданий // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2007. Т. 10. № 1. – С. 5-9.

Туляганов Александр Константинович

**СМЕСИ СУХИЕ ЦЕМЕНТНЫЕ НАПОЛЬНЫЕ
С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Автореферат
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Тираж 100. Заказ