

*На правах рукописи*



**Панченко Дмитрий Алексеевич**

**СУХАЯ ШТУКАТУРНАЯ СМЕСЬ  
НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ ИЗВЕСТИ  
С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иваново – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Румянцева Варвара Евгеньевна**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

**Официальные оппоненты:** **Пичугин Анатолий Петрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», главный научный сотрудник

**Ерофеева Ирина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится «28» июня 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета ([www.ivgpi.ru](http://www.ivgpi.ru)).

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Касьяненко Наталья Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** С повышением уровня жизни населения все больше внимания со стороны потребителей уделяется вопросам экологической безопасности и безвредности применяемых материалов. Большую часть времени человек проводит в собственных жилых помещениях, поэтому к выбору отделочных материалов, обеспечивающих комфортные условия для жизнедеятельности и способствующих сохранению здоровья человека, необходимо подходить особенно ответственно. Настоящей «чумой» XXI века стала аллергия. Аллергические реакции вызывают всевозможные болезнетворные микроорганизмы и особенно плесневые грибы. Высокая влажность воздуха или, наоборот, низкая негативно сказываются на состоянии слизистых оболочек и кожного покрова, что усиливает аллергические реакции. Штукатурные покрытия на основе извести обладают оптимальной паропроницаемостью, а, следовательно, регулируют микроклимат в помещении, их химический состав предопределяет стойкость к бактериям и плесневым грибам.

Производимые в настоящее время Российскими и зарубежными компаниями штукатурные составы на основе извести имеют стоимость в 2-3 раза выше стоимости своих цементных и гипсовых аналогов. Это связано с тем, что для их производства применяется известь-пушонка, которая отличается высокой энергоемкостью производства. Кроме того, для достижения высокой пластичности и водоудерживающей способности растворной смеси и требуемой прочности затвердевшего раствора необходимо достаточно высокое содержание извести-пушонки в составе сухой смеси, которое варьируется от 25 до 40 %. Все это ограничивает применением известковых штукатурных смесей для широкого потребления. Существует еще ряд проблем известковых составов, требующих решения, в числе которых низкая скорость твердения и не высокая прочность. Поэтому исследования по созданию сухих штукатурных смесей на основе извести с низкой стоимостью и высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками является весьма актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Исследования, описанные в диссертационной работе, выполнены в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова и связаны с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов твердения, формирования свойств и процессов протекания биологической коррозии растворов на основе извести. В рамках данной научной школы представлен большой объем исследований в области массопереноса при коррозии бетона и железобетона, в том числе и биологического воздействия, однако данные исследования направлены на цементные композиции, в связи с чем, необходимо расширение области исследований в направлении известковых составов.

Большой вклад в исследования биологической стойкости строительных композитов и способов ее повышения внесли: Румянцева В.Е., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Соломатов В.И., Строкова В.В., Строкин К.Б., Королев Е.В. Фундаментальные основы создания сухих строительных смесей, строительных растворов, отделочных и защитных покрытий, с повышенными эксплуатационными характеристиками сформированы на основании работ Баженова Ю.М., Селяева В.П., Низиной Т.А., Лесовика В.С., Пичугина А.П., Логаниной В.И., Пухаренко Ю.В., Белова В.В., Загороднюк Л.Х., Калашникова В.И., Пустовгара А.П. Вопросы разработки составов, выбора компонентов, топологии структуры строительных и отделочных материалов на основе извести решаются учеными Логаниной В.И., Пухаренко Ю.В. и Шангиной Н.Н. путем применения добавок на основе силикатов и алюминатов кальция, вступающих в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция. Большой объем теоретических положений по получению строительных материалов на основе воздушной извести, твердеющих за счет принудительной карбонизации изложен в монографии Федоркина С.И. и Любомирского Н.В. Отмечая значимость научных результатов, полученных данными авторами и

основываясь на их теоретических положениях и экспериментальных данных, необходимо провести исследования по созданию сухих штукатурных смесей на основе воздушной извести, растворы которых твердеют путем естественной карбонизации.

**Научная гипотеза диссертационного исследования.** Путем повышения дисперсности гашеной извести в составе сухой штукатурной смеси достигается более высокая скорость карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , формируется равномерная мелкокристаллическая структура кальцита, что приводит к увеличению прочности затвердевшего раствора. Получение высокодисперсного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  возможно путем гашения тонкомолотой воздушной извести совместно с песком в условиях, препятствующих свободному удалению пара.

**Объектами исследования** являются состав и свойства сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести.

**Предмет исследования:** эмпирические модели, отражающие взаимосвязь состава и свойств сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести и процессы твердения и структурообразования известковых композитов.

**Цель диссертационной работы:** разработка состава сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи:**

1. Изучить влияние различных способов гашения воздушной извести на дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и процессы твердения и формирования структуры штукатурного раствора на ее основе.

2. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность применения ИПС заводов по производству силикатного кирпича для получения сухой штукатурной смеси с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Выполнить экспериментальные исследования по влиянию модифицирующих добавок на свойства растворной смеси и затвердевшего раствора на основе ИПС. Получить математические модели зависимости свойств известкового штукатурного раствора от количества модифицирующих добавок.

4. Получить экспериментальные данные, характеризующие стойкость штукатурного раствора на основе воздушной извести к плесневым грибам.

5. Предложить технологические решения по организации производства сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести на предприятии по производству силикатного кирпича. Провести промышленные испытания и определить технико-экономическую целесообразность производства.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлено, что при гашении тонкомолотой воздушной извести в смеси с песком, образуется высокодисперсный  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , со средним размером частиц 1,5 мкм, что оказывает влияние на процессы твердения и структурообразования штукатурного раствора, выражающееся в увеличении его степени карбонизации в возрасте 28 суток в 4,7 раза и формировании равномерной мелкокристаллической структуры кальцита по сравнению с раствором на основе извести-пушонки, имеющей средний размер частиц 30 мкм.

2. Определено, что высокая дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  способствует увеличению водоудерживающей способности известково-песчаной смеси на 9 % и прочности затвердевшего раствора в возрасте 28 суток в 2,5 раза, по сравнению с составом на основе извести-пушонки.

3. Методом математического планирования эксперимента получены математические модели, отражающие зависимость физико-механических характеристик затвердевшего штукатурного раствора от содержания модифицирующих добавок, позволяющие оптимизировать составы сухих строительных смесей.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Изучено влияние способа гашения воздушной извести на дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и процессы структурообразования и твердения известковых композитов. Предложено применять в качестве основы для сухой штукатурной смеси ИПС заводов по производству силикатного кирпича, что позволяет достичь высоких технологических и эксплуатационных характеристик штукатурного раствора на основе воздушной извести и задействовать неиспользуемые мощности силикатных заводов в производстве новых видов продукции.

Получены эмпирические зависимости физико-механических характеристик известкового штукатурного раствора от содержания модифицирующих добавок, позволяющие оптимизировать составы сухих смесей.

Разработан состав сухой штукатурной смеси класса по прочности КП-II ( $R_{сж}=2,5$  МПа), с капиллярным водопоглощением  $0,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}^{0,5})$ , адгезионной прочностью  $0,37$  МПа, паропроницаемостью  $0,143 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ , при содержании извести в составе 11-13 %.

### **Методология и методы диссертационного исследования.**

В работе проанализирован отечественный и мировой опыт научно-исследовательских работ в области создания сухих строительных смесей, обобщены практика применения современных штукатурных покрытий и тенденции развития данной области строительного производства. Изучены теоретические вопросы твердения и формирования структуры и свойств штукатурных растворов и способы их регулирования. На основании этого поставлена цель, сформулированы задачи и предложены пути их решения. При решении поставленных задач применялся метод математического планирования эксперимента, достоверность полученных результатов оценивалась с применением методов математической статистики. При проведении экспериментальных работ применялся комплекс стандартных методик, регламентированных требованиями нормативных документов, с использованием поверенного лабораторного оборудования и современные научные методы: растровая электронная микроскопия, дифференциально-термический и рентгенофазовый анализ.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследования влияния способа гашения воздушной извести на дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;
- результаты исследований влияния дисперсности гашеной извести на технологические свойства растворной смеси и формирование структуры и свойств затвердевшего штукатурного раствора;
- эмпирические зависимости свойств известкового штукатурного раствора от вида и содержания модифицирующих добавок;
- результаты исследования грибостойкости известкового штукатурного раствора.

### **Степень достоверности полученных результатов.**

При проведении экспериментальных исследований применялись стандартные методики испытаний с использованием приборов, прошедших метрологическую поверку. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с применением статистических методов и согласуются с результатами производственных испытаний. Теоретические выводы не противоречат общепринятым закономерностям и известным данным.

### **Апробация результатов.**

По теме диссертационного исследования опубликовано 13 научных работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента РФ на изобретения.

Результаты научных исследований докладывались на IX межрегиональном семинаре «Экологические аспекты современных городов» (г. Иваново, 2022 г.), на

национальной молодежной научно-технической конференции «ПОИСК» (г. Иваново, 2022 г.), на национальной научно-практической конференции «Актуальные экологические проблемы современных городов (г. Иваново, 2023 г.) и на III Международном научно-практическом симпозиуме «Материаловедение, строительство, технологии и энергетика», MSTE-III-2023 (Таджикистан, 2023 г.).

#### **Внедрение результатов исследований.**

Результаты исследований внедрены на предприятии ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень). В состав предприятия входит технологический участок по производству силикатного кирпича. На основе ИПС применяемой для формования силикатного кирпича, организовано производство сухой штукатурной смеси, для чего реконструирован узел по окрашиванию ИПС и смонтирован участок для ее подсушивания. На данном участке выпущена пробная партия сухой штукатурной смеси, которая применена для оштукатуривания стен на объекте «Жилой квартал в границах ул. Дамбовская – Профсоюзная – р. Тура в г. Тюмени». По результатам оштукатуривания 800 м<sup>2</sup> стен установлено, что при стоимости сухой штукатурной смеси 9 руб. за 1 кг, снижение стоимости 1 м<sup>2</sup> штукатурного покрытия составляет 54 руб. по сравнению с ближайшим аналогом, что подтверждено актом внедрения.

На предприятии ООО «Меланж» (г. Тюмень) проведен промышленный эксперимент по высушиванию ИПС в сушильном барабане.

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «ИВГПУ» при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучающихся по направлению подготовки 05.03.06 Экология и природопользование, направленность – Охрана окружающей среды по дисциплинам: медико-биологические основы безопасности, токсикология; экология человека.

#### **Личный вклад автора.**

Автор сформулировал цель и задачи диссертационной работы, выбрал методы, разработал методологию проведения экспериментальных исследований и лично осуществлял постановку и проведение эксперимента по установлению влияния модифицирующих добавок на свойства сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести, проводил исследования биологической стойкости штукатурного раствора, обрабатывал и анализировал основные результаты. Автор разработал рекомендации по технологии производства сухой штукатурной смеси в условиях заводов по производству силикатного кирпича, практическая реализация которых также проводилась при его непосредственном участии.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 2.1.5.** Строительные материалы и изделия, по которой она рекомендуется к защите, в том числе пунктам:

1. Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых.

5. Разработка и внедрение способов активации компонентов строительных смесей путем использования физических, химических, механических и биологических методов, способствующих получению строительных материалов с улучшенными показателями структуры и свойств.

15. Развитие теоретических основ и технологии получения вяжущих композиций и сухих строительных смесей различного назначения.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 217 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 37 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ литературных данных, отражающих исторические этапы применения строительных материалов на основе извести и основные направления развития производства бетонов и растворов с ее применением. Проанализированы основные тенденции в производстве материалов для оштукатуривания стен, которые направлены на: создание покрытий с высокой паропроницаемостью для регулирования микроклимата в помещениях и высокой биостойкостью, особенно к плесневым грибам, споры которых являются весьма патогенными для человека; развитие технологии производства и применения сухих строительных смесей.

Изучены добавки, используемые для регулирования свойств сухих штукатурных смесей, а также теоретически обосновано применение в качестве основы для производства сухой штукатурной смеси ИПС, являющейся полуфабрикатом для формования силикатного кирпича. ИПС – это продукт, получаемый путем гашения извести в смеси с песком в силосах или реакторах, исключающих свободное удаление пара, что приводит к получению высокодисперсного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и значительному улучшению характеристик как штукатурной смеси, так и затвердевшего раствора. Анализ работы предприятий силикатной промышленности показал наличие около 50 % не загруженных производственных мощностей, которые могут быть переориентированы на производство сухих штукатурных смесей.

**Во второй главе** описаны материалы, применяемые в исследованиях и их характеристики. В качестве основы для сухой штукатурной смеси в диссертационной работе применялась ИПС завода ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень), которая готовится следующим образом: известково-кремнеземистое вяжущее, получаемое совместным помолом до удельной поверхности  $500\text{--}600 \text{ м}^2/\text{г}$  смеси кварцевого песка и комовой не гашеной извести, в пропорциях для получения активности по  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  – 50-55 %, смешивается с кварцевым песком с модулем крупности  $M_k = 0,6\text{--}0,7$  в соотношении, обеспечивающем получение активности 9-10 %. В смеситель добавляется вода в количестве необходимом для гашения извести и получения формовочной влажности 6-7 %. Полученная смесь загружается в силосную емкость объемом  $50 \text{ м}^3$ , где выдерживается в течение 1,5-2 часов до полного гашения извести. Перед подачей на пресс, смесь проходит через стержневой смеситель для растирания комочков, образующихся в процессе выдерживания смеси в силосе.

Для приготовления образца сравнения применялась известь-пушонка производства компании «Брозэкс» (г. Екатеринбург) с активностью по  $\text{CaO} + \text{MgO}$  – 52 %, удельной поверхностью –  $450 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Для регулирования свойств сухой штукатурной смеси применялись модифицирующие добавки:

- редиспергируемый полимерный порошок Полипласт РП 1011 на основе сополимера винилацетата и винилового эфира версатиковой кислоты;
- эфир целлюлозы (водорастворимая гидроксипропилметилцеллюлоза не модифицированная) HEADCEL НРК100М;
- гидрофобизаторы: кремнийорганические SILRES® BS POWDER А и SILRES® BS POWDER D и стеарат кальция.

Отражены методы исследования фракционного состава дисперсных компонентов, с применением лазерного анализатора размера частиц и физико-механические методы определения характеристик затвердевшего раствора, таких как: прочность при сжатии, адгезионная прочность, капиллярное водопоглощение и паропроницаемость. Для

исследования фазового состава затвердевшего штукатурного раствора применялись дифференциально-термический и рентгенофазовый анализ.

Также описана методика определения грибостойкости штукатурного раствора. Для заражения поверхности образцов применялись суспензии спор грибов *Paecilomyces elegans* VKM F-1329, *Aspergillus niger* RCAM 02334, *Cladosporium herbarum* VKM F-235, *Verticillium nigrescens* VKM F-2693, *Penicillium chrysogenum* RCAM 00888.

**Третья глава** работы посвящена разработке состава сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести.

Изучено влияние способа гашения воздушной извести на дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и свойства растворной смеси и затвердевшего штукатурного раствора. Результаты проведенного эксперимента показывают, что при гашении извести в смеси с песком в силосе или реакторе, исключающем свободное удаление пара, дисперсность  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  выше, чем при ее гашении в гидраторе при производстве пушонки.

Исследования дисперсного состава известково-песчаных смесей с одинаковой активностью 9,3 % по  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , одна из которых приготовлена с применением извести-пушонки, другая – путем совместного гашения извести и песка в силосе, представленные на рис. 1 показали, что ИПС, гашеная в силосе, содержит частицы размером менее 7 мкм, со средним размером 1,5 мкм, которые представлены  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а большое количество частиц с размерами от 15 до 50 мкм объясняется наличием в смеси тонкомолотого песка, присутствующего в составе ИКВ. Гидратная известь в составе известково-песчаной смеси на основе извести пушонки имеют средний размер частиц 30 мкм.

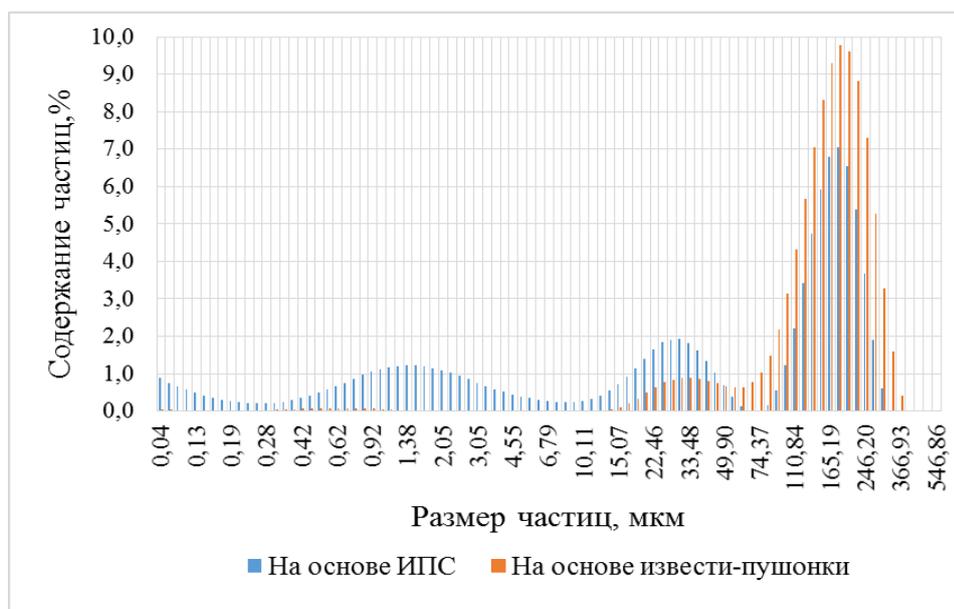


Рис. 1. Дисперсный состав известково-песчаных смесей

Исследование состава известково-песчаного раствора с помощью рентгенофазового анализа в возрасте 28 суток показало, что он не содержит гидросиликаты кальция. Твердение известково-песчаного раствора на начальном этапе обусловлено сближением частиц смеси за счет испарения воды и силами межмолекулярного взаимодействия, а в последующем – карбонизацией извести.

С помощью дифференциально-термического анализа (таблицы 1 и 2) установлено, что в образце штукатурного раствора возрасте двух лет полностью отсутствует  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , к 28 суткам связывается 77 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , к семи суткам – 52 %, а в возрасте трех дней содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в штукатурном растворе соответствует исходной активности ИПС – 9,3 %, т.е. в первые трое суток карбонизация вообще не происходит, что, вероятно, связано с высоким водосодержанием раствора.

Таблица 1 – Изменение массы и энергии образцов известкового штукатурного раствора различного возраста при испытании на ДТА.

t, °C	Характер эффекта	Процесс, вызывающий эффект	Изменение массы, %, для образца в возрасте			
			3 сут.	7 сут.	28 сут.	2 года
430-480	Эндо-термический	Дегидратация гидроксида кальция $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	2,39	1,23	0,55	0
600-760	Эндо-термический	Диссоциация первичного $\text{CaCO}_3$ (арагонит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	1,53	2,11	2,44	1,75
760-850	Эндо-термический	Диссоциация вторичного $\text{CaCO}_3$ (кальцит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	1,09	3,15	4,89	8,46

Таблица 2 – Содержание гидроксида кальция и карбоната кальция в образцах штукатурного раствора различного возраста

Возраст раствора	Содержание $\text{Ca(OH)}_2$ , %	Содержание $\text{CaCO}_3$ (вторичный), %
3 сут.	9,8	2,5
7 сут.	5,1	7,2
28 сут.	2,3	11,1
2 года	0	19,3

Дисперсность извести также оказывает влияние на скорость твердения штукатурного раствора. Результаты дифференциально-термического анализа образцов затвердевшего штукатурного раствора (таблицы 3 и 4) в возрасте 28 суток свидетельствуют о том, что раствор на основе ИПС имеет более высокую степень карбонизации, чем раствор на основе извести-пушонки.

Таблица 3 – Изменение массы и энергии образцов штукатурного раствора при дифференциально-термическом анализе

t, °C	Характер эффекта	Процесс, вызывающий эффект	Изменение массы, %, для образца	
			на основе ИПС	на основе извести-пушонки
430-480	Эндотермический	Дегидратация гидроксида кальция $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	0,93	1,74
600-760	Эндотермический	Диссоциация первичного $\text{CaCO}_3$ (арагонит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	0,76	1,72
760-850	Эндотермический	Диссоциация вторичного $\text{CaCO}_3$ (кальцит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	5,76	1,22

Таблица 4 – Содержание гидроксида кальция и карбоната кальция в образцах

Вид штукатурного раствора	Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , %	Содержание $\text{CaCO}_3$ , %	
		первичный	вторичный
на основе ИПС	3,8	1,7	13,1
на основе извести-пушонки	7,2	3,9	2,8

На прочность известкового раствора влияет не только степень карбонизации, но и величина кристаллов и степень их срастания. Размер кристаллитов может быть оценен по величине физического уширения пика, соответствующего данному соединению на дифрактограмме (рис. 2). Из представленных данных можно сделать вывод, что кристаллы  $\text{CaCO}_3$  в образце штукатурного раствора на основе извести-пушонки более крупные (рис. 2-б), хотя общее количество вторичного карбоната кальция меньше.

Этот факт можно объяснить следующим образом: химическая реакция карбонизации происходит на поверхности известковых зерен. Поэтому, чем больше частиц  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , тем большее количество центров кристаллизации  $\text{CaCO}_3$  возникает в определенный момент времени. Образование зародышей кристаллов на готовой поверхности происходит легче, чем в объеме раствора, потому что работа их образования на границе раздела фаз меньше работы, требующейся для возникновения зародыша кристалла в объеме раствора. Поэтому дальнейший рост кристаллов  $\text{CaCO}_3$  происходит на уже возникших центрах кристаллизации. При большом количестве более мелких центров кристаллизации рост кристаллов будет происходить равномернее.

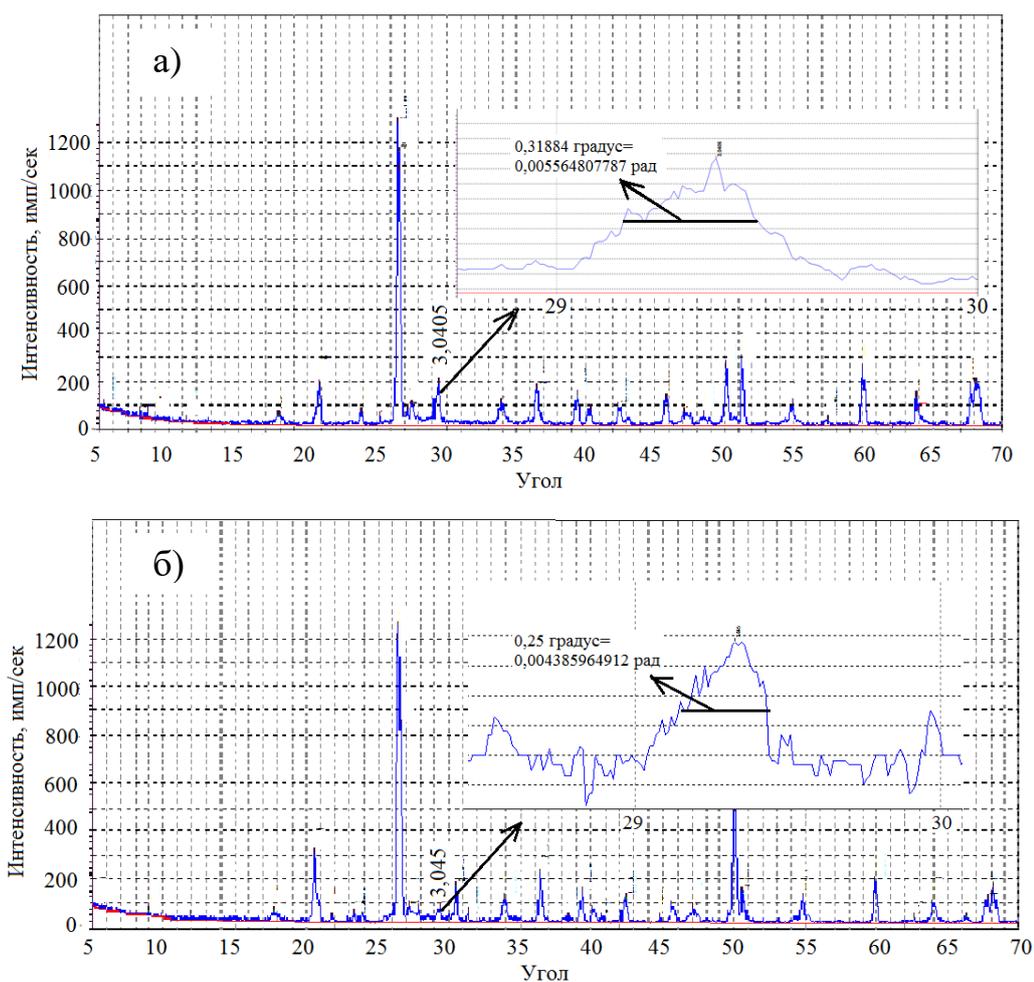


Рис. 2. Дифрактограммы штукатурного раствора: а) на основе ИПС; б) на основе извести-пушонки

При формировании крупнокристаллической структуры возникающие напряжения значительно выше в сравнении с мелкокристаллической. Следовательно, для достижения большей прочности необходимо стремиться к созданию условий для формирования как можно большего количества центров кристаллизации, их быстрому росту, сближению и срастанию.

Предложенный способ гашения извести реализуется при подготовке ИПС для производства силикатного кирпича. Для оценки целесообразности применения ИПС заводов по производству силикатного кирпича в качестве основы для сухой штукатурной смеси были оценены свойства растворной смеси и затвердевшего раствора на ее основе по сравнению с раствором, приготовленным на основе извести-пушонки, при одинаковом содержании  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Установлено, что смесь на основе ИПС требует большего количества воды для получения той же подвижности (Пк3), но при этом обладает более высокой водоудерживающей способностью – 93%, по сравнению со смесью на основе извести-пушонки, водоудерживающая способность которой составляет 84%. Способ гашения извести оказывает влияние и на прочность затвердевшего раствора. Образцы из раствора на основе ИПС имели прочность 0,86 МПа, а раствор на основе извести-пушонки – 0,33 МПа, т.е. в 2,5 раза меньше.

Затвердевший раствор на основе ИПС обладает следующими характеристиками:

- средняя плотность – 1400-1500 кг/м<sup>3</sup>;
- прочность при сжатии в возрасте 28 суток – 0,7-0,9 МПа;
- капиллярное водопоглощение – 0,95-0,98 кг/(м<sup>2</sup>·мин<sup>0,5</sup>);
- адгезионная прочность – 0,26 МПа.

Данные характеристики не удовлетворяют требованиям нормативного документа.

Для увеличения прочности при сжатии, адгезионной прочности и снижения капиллярного водопоглощения затвердевшего штукатурного раствора в работе предложено применение следующих добавок: редиспергируемого полимерного порошка (РП); эфира целлюлозы (ЭЦ); гидрофобизатора (ГФ) – стеарата кальция. Так как данные добавки оказывают взаимное влияние на характеристики затвердевшего штукатурного раствора, выполнена оптимизация его состава с помощью проведения 3-х факторного эксперимента.

Диапазоны варьирования входных параметров (дозировки добавок) установлены на основании предварительных исследований их влияния на свойства затвердевшего штукатурного раствора. Результаты 3-х факторного эксперимента представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты 3-х факторного эксперимента

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных, % от массы ССС			Выходной параметр		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	ГФ	ЭЦ	РП	R <sub>сж</sub> , МПа	R <sub>ад</sub> , МПа	W <sub>к</sub> , кг/(м <sup>2</sup> ·мин <sup>0,5</sup> )
1	-1	-1	-1	0	0	1	1,71	0,28	0,72
2	+1	-1	-1	0,4	0	1	2,31	0,30	0,21
3	-1	+1	-1	0	0,2	1	1,31	0,39	0,82
4	-1	-1	+1	0	0	3	4,89	0,38	0,31
5	-1	0,19	0,19	0	0,119	2,19	3,34	0,42	0,49
6	0,19	-1	0,19	0,238	0	2,19	4,04	0,33	0,18
7	0,19	0,19	-1	0,238	0,119	1	1,82	0,38	0,43
8	-0,29	+1	+1	0,142	0,2	3	4,75	0,48	0,32
9	+1	-0,29	+1	0,4	0,071	3	5,28	0,46	0,04
10	+1	+1	-0,29	0,4	0,2	1,71	3,02	0,47	0,20

После обработки результатов эксперимента и подтверждения их адекватности, получены уравнения математической модели:

$$R_{сж} = 1,405x_1 - 2,12x_2 + 1,58x_3 + 0,181 \quad (1)$$

$$R_{ад} = -0,145x_1 + x_2 + 0,042x_3 + 0,45x_1^2 - 2,4x_2^2 + 0,45x_1x_2 + 0,244 \quad (2)$$

$$W_k = -1,79x_1 + 0,05x_2 - 0,368x_3 + 0,625x_1^2 + 2x_2^2 + 0,041x_3^2 + 0,26x_1x_3 + 0,1x_2x_3 + 1,049 \quad (3)$$

Графические зависимости свойств штукатурного раствора от варьируемых переменных построены при константе одного из параметров, оказывающего наименьшее влияние на свойства (рис. 3).

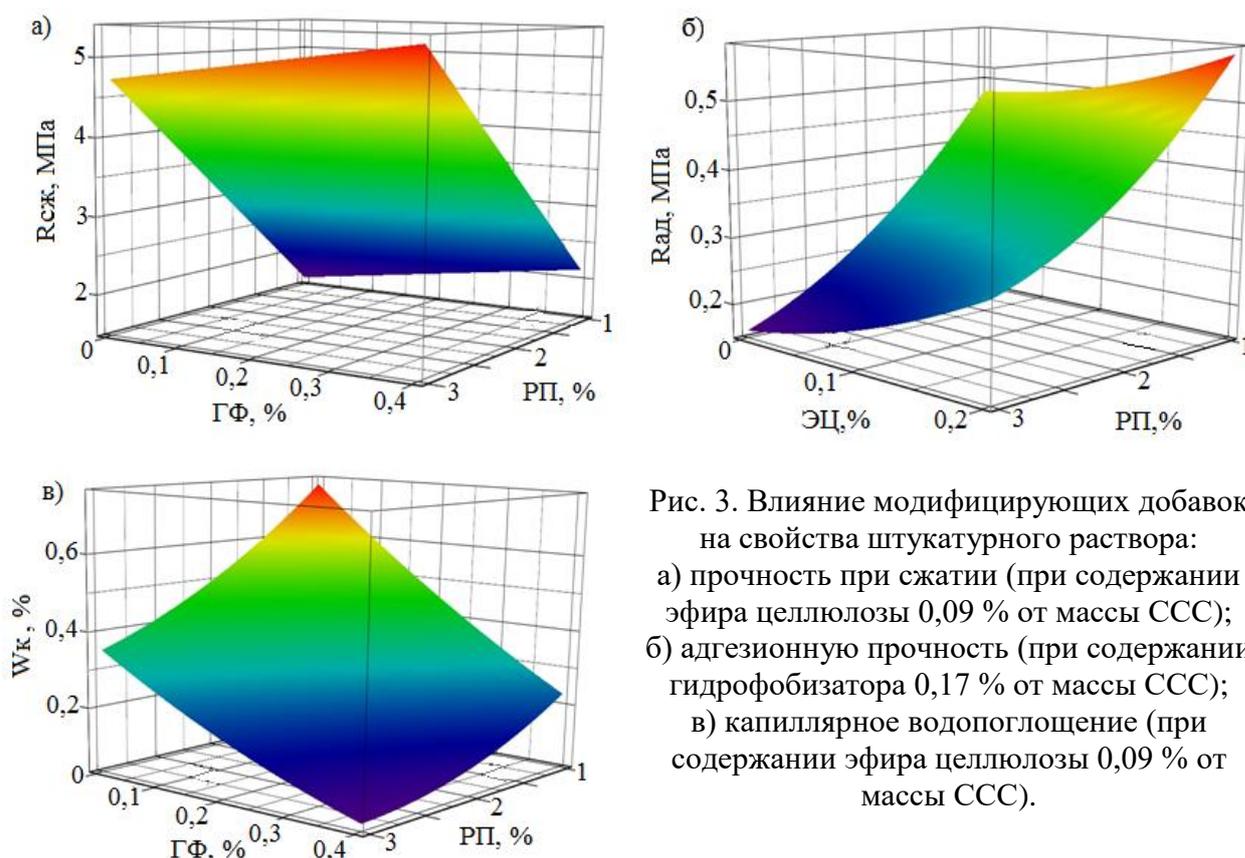


Рис. 3. Влияние модифицирующих добавок на свойства штукатурного раствора:  
 а) прочность при сжатии (при содержании эфира целлюлозы 0,09 % от массы ССС);  
 б) адгезионную прочность (при содержании гидрофобизатора 0,17 % от массы ССС);  
 в) капиллярное водопоглощение (при содержании эфира целлюлозы 0,09 % от массы ССС).

В результате анализа полученных математических моделей установлено минимальное количество модифицирующих добавок от массы ССС, необходимое для получения штукатурного раствора с требуемыми характеристиками, а именно: гидрофобизатора – 0,17 %; эфира целлюлозы – 0,09%; редиispersируемого полимера – 1,44 %.

В качестве критериев оптимизации выступали требования, регламентированные нормативными документами: прочность при сжатии в возрасте 28 суток – 2,5 МПа – минимальное значение для класса КП-II; капиллярное водопоглощение – 0,4 кг/(м<sup>2</sup>·мин<sup>0,5</sup>); адгезионная прочность – 0,37 МПа.

Адекватность полученных математических моделей была подтверждена путем проведения проверочного эксперимента.

Результаты оценки паропроницаемости штукатурного раствора на основе известки по сравнению с аналогами на основе гипса и цемента подтвердили его более высокую паропроницаемость, которая составляет 0,143 мг/(м·ч·Па).

**В четвертой главе** диссертации представлены результаты оценки грибостойкости штукатурного раствора на основе извести по сравнению с аналогами на основе цемента и гипса. Также определялось влияние модифицирующих органических добавок на грибостойкость известкового штукатурного раствора.

Исследовались составы:

Состав № 1 – ИПС без добавок.

Состав № 2 – Гипсовая штукатурная смесь.

Состав № 3 – Цементная штукатурная смесь.

Состав № 4 – ИПС с добавкой ЭЦ, в количестве 0,09 % от массы сухой смеси.

Состав № 5 – ИПС с добавкой РП, в количестве 1,44 % от массы сухой смеси.

По 10 образцов от каждого состава обрабатывали суспензией спор плесневых грибов и помещали в термостат с влажностью более 90 % и температурой 30 °С. После 28 суток выдерживания зараженных образцов затвердевшего штукатурного раствора в камере-термостате, визуальный осмотр, как и осмотр под микроскопом, не выявил наличия каких-либо признаков грибковых колоний ни на одном из составов. Однако, по результатам посева соскобов на питательную среду в образцах штукатурного раствора на гипсовой основе обнаружены споры грибов (рис. 4 а-2).

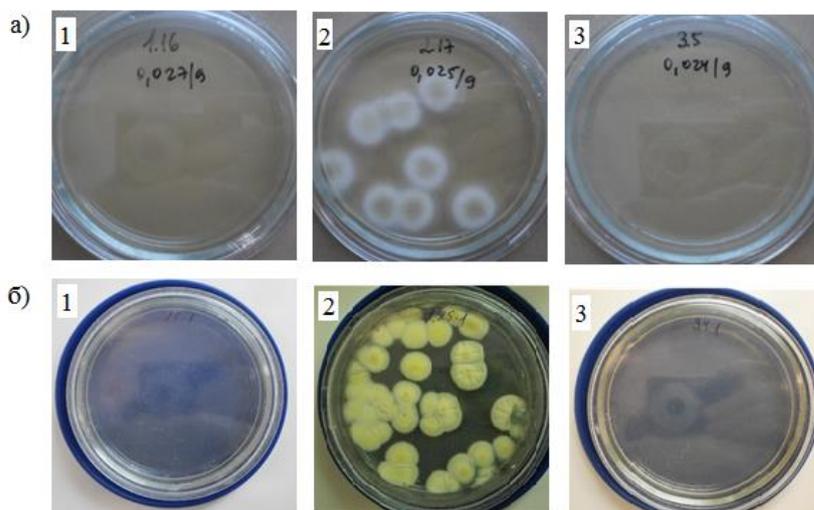


Рис. 4. Результаты посева соскобов штукатурного раствора, на основе:

1 – извести; 2 – гипса; 3 – цемента;

а) 28 суток; б) 84 суток

Далее было продолжено хранение образцов в термостате с целью определения возможности заражения известкового штукатурного раствора спорами грибов от гипсового. После 84-х суток были проведены повторные исследования соскобов с образцов и установлено, что заражение ни одного из составов на основе ИПС и состава на основе цемента не произошло. Количество спор грибов на гипсовом образце увеличилось на порядок (рис. 4 б-2).

Для интенсифицирования роста грибов было выполнено повторное заражение образцов известкового и гипсового штукатурных растворов, затем образцы были помещены в питательную среду. Начало биообращения гипсового образца визуально отмечено через 28 суток хранения, спустя 84 суток поверхность гипсового штукатурного раствора была покрыта колониями грибов, тогда как образец известкового штукатурного раствора визуально оставался чистым. Результаты микроскопического исследования (рис. 5) подтвердили отсутствие мицелия грибов в известковом штукатурном растворе и глубокое прорастание мицелием структуры образца на основе гипса.



Рис. 5. Микрофотографии штукатурного раствора, после хранения в питательной среде в течение 84 суток, на основе: а) гипса; б) извести.

**В пятой главе** предложена технология производства и рассчитана технико-экономическая эффективность применения сухой штукатурной смеси на примере предприятия ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (ООО «ВЗКГ»). На данном предприятии проведены промышленные испытания и выпущена пробная партия сухой штукатурной смеси, по результатам чего определена ориентировочная себестоимость, которая составляет 6,6 руб. за 1 кг. По результатам оштукатуривания 800 м<sup>2</sup> стен на строительном объекте в г. Тюмени, установлено, что при стоимости сухой штукатурной смеси 9 руб. за 1 кг, снижение стоимости 1 м<sup>2</sup> штукатурного покрытия составляет 54 руб. по сравнению с ближайшим аналогом, что подтверждено актом внедрения.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы, представляющие научную и практическую значимость:

1. Определено, что при гашении тонкомолотой извести в смеси с песком, образуется  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  со средним размером частиц 1,5 мкм, тогда как известь-пушонка имеет средний размер частиц 30 мкм. Установлено, что повышение дисперсности  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  приводит к ускорению процесса карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и формированию мелкокристаллической структуры кальцита.

2. Теоретически обоснована возможность производства сухой штукатурной смеси на основе ИПС заводом по производству силикатного кирпича, что обусловлено высокой дисперсностью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в ее составе за счет особых условия гашения в силосе. Экспериментально подтверждено, что за счет применения в качестве основы для сухой строительной смеси ИПС достигается увеличение водоудерживающей способности растворной смеси на 9% и прочности при сжатии в 2,5 раза по сравнению со штукатурным раствором на основе извести-пушонки.

3. В результате трехфакторного эксперимента установлены математические модели, отражающие зависимость свойств штукатурного раствора, таких как прочность при сжатии, адгезионная прочность и капиллярное водопоглощение, от содержания модифицирующих добавок: редиспергируемого полимерного порошка, эфира целлюлозы и гидрофобизатора. В результате анализа полученных зависимостей, установлено требуемое количество модифицирующих добавок от массы ССС, а именно: гидрофобизатора – 0,17 %; эфира целлюлозы – 0,09 %; редиспергируемого полимера –

1,44 %, необходимое для получения затвердевшего раствора со следующими характеристиками:

- класс по прочности КП-II ( $R_{сж}=2,5$  МПа);
- капиллярное водопоглощение  $0,4$  кг/(м<sup>2</sup>·ч<sup>0,5</sup>);
- адгезионная прочность  $0,37$  МПа;
- паропроницаемость  $0,143$  мг/(м·ч·Па).

4. Доказана высокая стойкость штукатурного раствора на основе воздушной извести по отношению к действию плесневых грибов. Установлено, что модифицирующие добавки органического происхождения, такие как РП в количестве 1,44% и ЭЦ в количестве 0,09% от массы ССС не снижают грибостойкость штукатурного раствора на основе воздушной извести.

5. Предложены технологические решения по организации производства сухой штукатурной смеси на основе воздушной извести на предприятии по производству силикатного кирпича. Проведены промышленные испытания, выпущена пробная партия, по результатам чего определена ориентировочная себестоимость, которая составляет 6,6 руб. за 1 кг. По результатам оштукатуривания 800 м<sup>2</sup> стен на строительном объекте в г. Тюмени, установлено, что при стоимости сухой штукатурной смеси 9 руб. за 1 кг, снижение стоимости 1 м<sup>2</sup> штукатурного покрытия составляет 54 руб. по сравнению с ближайшим аналогом, что подтверждено актом внедрения.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### ***Статьи в журналах, входящий в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ***

1. Использование кладочных растворов на основе извести при производстве работ в зимнее время / К.А. Мемячкин, М.В. Кудоманов, **Д.А. Панченко** // Строительные материалы. 2009. № 3. С. 52-53.

2. Анализ коррозионной стойкости штукатурных покрытий на основе извести и способы ее повышения / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко, В.С. Коновалова, О.И. Королева // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. №3 (44). – С. 99-108.

3. Разработка состава сухой штукатурной смеси на основе высокодисперсной извести / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко, В.С. Коновалова, Э.Н. Хафизова // Строительные материалы. 2023. № 6. С. 57-64.

4. Микробиологическая стойкость штукатурного раствора на основе извести / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко, В.С. Коновалова, Э.Н. Медведева, Е.А. Шварев // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 169-177.

#### ***Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий и международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ***

5. Защита ограждающих конструкций предприятий текстильной промышленности от микробиологической коррозии материалами на основе гидроксида кальция / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко, Б.Е. Нармания // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 1 (372). С. 158-164.

#### ***Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus***

6. Relationship between the Structure and Properties of Plaster Mortar Based on Lime-Sand Mixture Modified with Redispersible Polymer Powder / V. Roumyantseva, **D. Panchenko**, Yu. Panchenko, B. Narmaniya, Yu. Loseva // AIP Conference Proceedings, Volume 3154. III International Scientific and Practical Symposium "Materials Science and Technology" (MST-III-2023). 2024. 020009.

### **Патенты**

7. Пат. №2598254 Российская Федерация, МПК С2 Строительный раствор на основе известково-песчаной смеси / Панченко Ю.Ф., **Панченко Д.А.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»; заявл. 20.09.2016., опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26.

8. Пат. №2813509 Российская Федерация, МПК С1 Сухая штукатурная смесь на основе извести / **Панченко Д.А.** Панченко Ю.Ф., Королева О.И., Нармания Б.Е., Румянцева В.Е. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»; заявл. 26.05.2023., опубл. 12.02.2024, Бюл. № 5.

### **Статьи в изданиях, индексируемых в базе РИНЦ**

9. Разработка состава сухой штукатурной смеси на основе извести / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 2. С. 39-46.

10. Исследование возможности производства сухой известковой штукатурной смеси на основе полуфабриката для производства силикатного кирпича / **Д.А. Панченко**, В.Е. Румянцева // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 354-356.

11. Экологические аспекты штукатурного раствора на основе извести / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко // Экологические аспекты современных городов: сборник материалов IX межрегионального семинара. – Иваново, 2023. С. 74-76.

12. Оптимизация состава сухой штукатурной смеси на основе извести / В.Е. Румянцева, **Д.А. Панченко**, Ю.Ф. Панченко // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022-2023 годы: Научные труды РААСН : В 2 томах : Том 2. – Москва, 2024. С. 369-377.

13. Оценка паропроницаемости штукатурного покрытия на основе воздушной извести / **Д.А. Панченко**, В.Е. Румянцева // Научный аспект. 2024. Т. 26. №4. С. 3280-3285.

### **Условные обозначения и сокращения:**

ССС – сухая строительная смесь

ИКВ – известково-кремнеземистое вяжущее

ИПС – известково-песчаная смесь

ЭЦ – эфир целлюлозы

РП – редиспергируемый полимерный порошок

ГФ – гидрофобизатор

$R_{сж}$  – прочность при сжатии, МПа

$R_{ад}$  – адгезионная прочность, МПа

$W_k$  – капиллярное водопоглощение,  $кг/(м^2 \cdot мин^{0,5})$