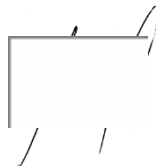


На правах рукописи



СТУПАК Мария Васильевна

**СУХИЕ ШТУКАТУРНЫЕ СМЕСИ
ДЛЯ САНИРОВАНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ
КИРПИЧНЫХ КЛАДОК**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Харитонов Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: **Румянцева Варвара Евгеньевна**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
политехнический университет», Институт
информационных технологий, естественных
и гуманитарных наук, директор;

Соловьёва Валентина Яковлевна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Инженерная химия
и естествознание», заведующий кафедрой;

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

Защита диссертации состоится «09» июня 2025 в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/stupak-mariya-vasilevna>

Автореферат разослан «17» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гайдо Антон Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования. Одной из распространенных причин разрушения каменных конструкций является солевая коррозия. В связи с чем необходимость увеличения эксплуатационного ресурса кирпичных кладок, подверженных воздействию влаги и водорастворимых солей, требует разработки комплексных технологических решений, предупреждающих развитие коррозионных процессов.

Зачастую в качестве основного элемента подобных решений предусматривают нанесение saniрующих штукатурных составов, производимых по технологии сухих строительных смесей. Указанный материал получил широкое распространение при проведении работ по реконструкции и реставрации массивных кирпичных кладок с целью их защиты от солевой коррозии. Однако применение saniрующих штукатурок в настоящее время сопряжено с отсутствием научно обоснованных подходов к разработке составов данных смесей, которые бы учитывали их функциональное назначение. Другой проблемой является недостаточность нормативных документов, закрепляющих основные требования к saniрующим штукатуркам. В связи с этим характеристики saniрующих смесей заявляются производителями в достаточно широких диапазонах без надлежащего обоснования, что затрудняет выбор наиболее эффективного материала для конкретных условий применения.

Также недостаточно исследованными остаются вопросы, касающиеся методов оценки ключевых параметров штукатурных растворов, напрямую связанных с механизмом saniрования и указывающих на эффективность защитных свойств материала по отношению к солевой коррозии. Переход водных растворов солей из кирпичной кладки с их последующим блокированием в структуре saniрующего покрытия достигается за счет наличия в последнем системы порового пространства с оптимальными показателями перколяции. Поэтому, несмотря на распространенное мнение, пористость не может быть принята в качестве основного критерия эффективности.

Кроме того, требует разрешения вопрос целесообразности использования многослойных saniрующих систем. Технология однослойного нанесения является наиболее приоритетной по сравнению со сложным многоступенчатым устройством saniрующих покрытий, состоящих из нескольких слоев различных растворов. Подобные системы характеризуются высокой трудоемкостью нанесения и требуют соблюдения строгой последовательности технологических операций. На практике, как правило, порядок устройства многослойного покрытия соблюдается не в полной мере, в результате чего защитный эффект saniрующей системы не проявляется.

Таким образом, в решении проблемы защиты каменных конструкций от солевой коррозии актуальным является получение штукатурных составов для санирования, обладающих эксплуатационной и экономической эффективностью, путем направленного формирования их структуры и свойств.

Степень разработанности темы диссертации. Работа основана на исследованиях отечественных и зарубежных ученых (Альперович И.А., Инчик В.В., Минас А.И., Москвин В.М., Баженов Ю.М., Корнеев В.И., Зозуля П.В., Соломатов В.И., Шейкин А.Е. Румянцева В.Е., Лесовик В.С., Логанина В.И., Соловьёва В.Я., Шангина Н.Н., Федосов С.В., Фрессель Ф., Хорст Р. и др.) в области строительных растворов, производимых по технологии сухих смесей, а также на результатах исследований по защите строительных конструкций от водно-солевых нагрузок, и является их логическим продолжением.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного технологического решения, направленного на получение санирующего штукатурного раствора для защиты кирпичной кладки от солевой коррозии.

Задачи исследования:

1. Выявить закономерности миграции водных растворов солей в капиллярно-пористых системах и предложить гипотезу механизма санирования кирпичных кладок с использованием однослойных штукатурных составов;

2. Выявить ключевые параметры, отражающие эффективность защитных свойств санирующих растворов по отношению к солевой коррозии, и определить базовый состав санирующей штукатурной смеси;

3. Исследовать закономерности влияния смеси пористых заполнителей на формирование структуры и защитных свойств санирующих растворов;

4. Разработать метод проектирования составов сухих санирующих смесей для защиты кирпичных кладок от солевой коррозии;

5. Произвести опытно-промышленную апробацию, разработанных санирующих составов, произведенных по технологии сухих строительных смесей.

Объект исследования – сухие штукатурные смеси для отделки и защиты от коррозии увлажненных и засоленных кирпичных кладок.

Предмет исследования – закономерности формирования структуры строительных растворов, отличающихся способностью поглощать и удерживать в своем объеме водные растворы солей, мигрирующие из кирпичной кладки.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Доказано, что saniрующий штукатурный раствор на цементно-известковом вяжущем и пористых заполнителях (перлитовый песок, гранулированное пеностекло) способен за счет регулирования капиллярной проводимости и паропроницаемости обеспечить массоперенос из кирпичной кладки водных растворов солей и их блокирование в объеме saniрующего слоя;

2. Обоснованы включение капиллярного и поверхностного поглощения водных растворов солей в систему критериев качества saniрующих штукатурных растворов, применяемых при однослойном нанесении, и методы их количественной оценки;

3. Предложен и обоснован структурный критерий, выражающий соотношение объема закрытых пор к объему цементно-известкового камня, при котором капиллярное и поверхностное поглощения обеспечивают условия для блокирования солевых отложений. Определен диапазон значений структурного критерия (0,63–0,71) для проектирования составов эффективных сухих saniрующих штукатурных смесей с учетом характеристик используемых пористых заполнителей и степени засоленности кирпичной кладки.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении представлений о регулировании параметров структуры и свойств saniрующих штукатурных смесей, связанных с поглощением и переносом водных растворов солей, на основе применения смешанного вяжущего и пористых заполнителей.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в получении сухих saniрующих строительных смесей на основе предложенного метода проектирования составов, заключающегося в определении количества пористых заполнителей для формирования необходимого объема блокирующих (закрытых) пор из условия соответствия структурного критерия *n* установленным оптимальным значениям.

Методология и методы исследования. Научные гипотезы и результаты практических экспериментов, представленные в работе, базируются на достижениях как отечественных, так и зарубежных ученых в области разработки сухих строительных смесей и защиты строительных конструкций и материалов от водно-солевых нагрузок. При проведении диссертационного исследования использовались стандартные методы испытаний, закрепленные в действующей нормативно-технической документации, метод рентгеноспектрального анализа с применением электронного сканирующего микроскопа, метод ртутной порометрии, а также нестандартные методы исследований, использование которых обусловлено спецификой работы.

Положения, выносимые на защиту:

1) Теоретическое обоснование механизма saniрования кирпичных кладок однослойными штукатурными покрытиями;

2) Методы количественной оценки величин капиллярного и поверхностного поглощения солевых растворов;

3) Обоснование роли состава вяжущего и пористых заполнителей в регулировании параметров порового пространства saniрующего раствора для обеспечения процесса массопереноса водорастворимых минералов из кирпичной кладки в штукатурный слой;

4) Структурный критерий, лежащий в основе разработанного метода проектирования составов сухих saniрующих смесей, позволяющий получить защитные штукатурные покрытия, отличающиеся эффективным блокированием солей в своей структуре при однослойном нанесении;

5) Апробация полученных результатов в производственных условиях при устройстве защитных покрытий на кирпичных основаниях с повышенной влажностью и признаками высолообразования.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.1.5. Строительные материалы и изделия, а именно пункту 13 «Разработка материалов и технологий для строительства, реконструкции и санации зданий и сооружений в различных климатических условиях с учетом сопротивляемости температурно-влажностным и другим факторам»; пункту 15 «Развитие теоретических основ и технологии получения вяжущих композиций и сухих строительных смесей различного назначения».

Степень достоверности и апробации результатов.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена применением фундаментальных положений строительного материаловедения, апробированных методик проведения испытаний с использованием оборудования, прошедшего метрологическую поверку, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также их воспроизводимостью.

Основные результаты проведенного исследования были представлены на таких научных конференциях как: молодежная научная школа с международным участием «Современные перспективы строительства 2021» (Калининград, 24–25 ноября 2021 г.), LXXVI Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура-строительство-транспорт» (Санкт-Петербург, 18–21 октября 2022 г.), Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства» (Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2023 г.), Международная научно-практическая конференция «Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе» (Саратов, 17–18 апреля 2023 г.), XVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Новосибирск, 18–20 апреля 2023 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных изданиях общим объемом 4,83 п.л., лично автором – 3,90 п.л., из них 4 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ, получен 1 патент РФ на изобретение № 2835651 (02.08.2024).

Личный вклад автора заключается в определении цели исследования, в постановке задач для ее достижения, в формулировании рабочей гипотезы, в комплексном анализе научно-технической литературы по теме диссертации, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в проверке положений, изложенных в диссертации, в производственных условиях, в подготовке публикаций по основным результатам исследования.

Структура и объем диссертации.

Диссертационное исследование состоит из введения, 5 глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа представлена на 125 страницах, содержит 41 рисунок, 33 таблицы, список литературы из 121 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор научно-технической литературы и изложено современное состояние вопроса по теме диссертации. Установлен факт того, что применение saniрующих штукатурных смесей сопряжено с отсутствием обязательных требований к данному виду материалов, а также научно обоснованных подходов к его получению и применению.

Во второй главе представлены ключевые характеристики сырьевых материалов, приведен перечень применяемого оборудования, указаны стандартные методы испытаний, описаны методы определения капиллярного и поверхностного поглощений, а также величины солестойкости затвердевшего раствора.

В третьей главе изложена и обоснована гипотеза о механизме массопереноса солевых растворов из кирпичной кладки в капиллярную систему saniрующего покрытия. Приведен состав базового раствора, обеспечивающий получение проводящей структуры штукатурного материала. Обоснована возможность регулирования капиллярной проводимости saniрующих растворов за счет введения в состав смеси пористых мелкозернистых заполнителей, широко используемых в индустрии строительных материалов.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния пористых заполнителей на параметры, связанные с поглощением и транспортировкой водных растворов солей. Предложен и рассчитан структурный критерий, при котором достигаются наилучшие условия блокирования солей в структуре saniрующего покрытия. Предложен метод проектирования

составов сухих санирующих смесей, позволяющий учитывать изменение свойств пористых заполнителей.

В пятой главе представлены результаты опытно-промышленных испытаний разработанных составов сухих санирующих смесей с оценкой технико-экономических показателей.

В заключении изложены основные выводы диссертационного исследования, обозначены возможные направления продолжения работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Санирующие покрытия как способ защиты от солевой коррозии.

Эксплуатация каменных конструкций в условиях накопления в них избыточной влаги и водорастворимых минералов характеризуется высоким риском их разрушения вследствие солевой коррозии. Поэтому при реновации подобных объектов требуется не только ликвидировать источник увлажнения, за счет выполнения гидроизоляционных работ, но и провести мероприятия, направленные на устранение негативного воздействия водных растворов солей, которые сохраняются в кладке.

На сегодняшний день одним из применяемых методов снижения водно-солевых нагрузок на каменные конструкции является устройство санирующих систем. Под термином «санация» понимается процесс защиты увлажненных и засоленных кирпичных кладок от солевой коррозии в основе которого лежит механизм поглощения и нейтрализации солевых растворов за счет нанесения специальных штукатурных составов.

Санирующие системы представляют собой многослойные покрытия на основе пористой (базовой) и санирующих штукатурок. Предполагается, что высокопористая базовая штукатурка выполняет функцию соленакапливающего слоя, через который солевые растворы переходят по направлению к зоне испарения. Последняя образуется на границе с санирующим слоем, обладающим повышенным значением параметра паропроницаемости и малой степенью капиллярной активности. Санирующий слой должен сдерживать дальнейший транспорт водных растворов, за счет чего соли остаются в структуре санирующей системы, а избыточная влага свободно испаряется.

Основной недостаток санирующих систем состоит в их низкой надежности ввиду необходимости устройства многослойных покрытий. Нанесение нескольких слоев предполагает соблюдение множества технологических требований, что в условиях строительной площадки приводит к большому количеству ошибок и дефектов. Кроме этого, многослойные санирующие системы более трудоемки и требуют большего времени для производства работ.

В соответствии с изложенным, saniрующие растворы являются важным элементом в системе защиты от солевой коррозии, но требуется их совершенствование в части повышения надежности путем разработки однослойных штукатурных покрытий.

Рабочая гипотеза: Использование смешанного вяжущего и мелкозернистых пористых заполнителей позволяет получить saniрующий штукатурный раствор, который при однослойном нанесении обеспечивает естественный переход солевых растворов в свою структуру, с последующей направленной кристаллизацией водорастворимых минералов.

2. Обоснование применения смешанного вяжущего для обеспечения перехода солевых растворов в saniрующий штукатурный слой.

Естественный переход жидкой фазы из кирпичной кладки в saniрующий слой возможен в том случае, когда размеры капилляров в структуре кирпича превышают капилляры в поровом пространстве штукатурного покрытия. Это позволяет обеспечить миграцию солевых растворов в направлении защитного слоя, предупреждая обратное движение жидкости в кладку.

Изученная с помощью ртутной порометрии структура керамического полнотелого кирпича, характеризуется преимущественно порами размером от 10^{-6} до 10^{-4} м (рис. 1). Следовательно, для обеспечения надежного перехода водных растворов солей из кирпичной кладки в капиллярную систему защитного материала, структура порового пространства saniрующего раствора должна состоять преимущественно из капилляров, размер которых находится в интервале от 10^{-8} до 10^{-5} м.

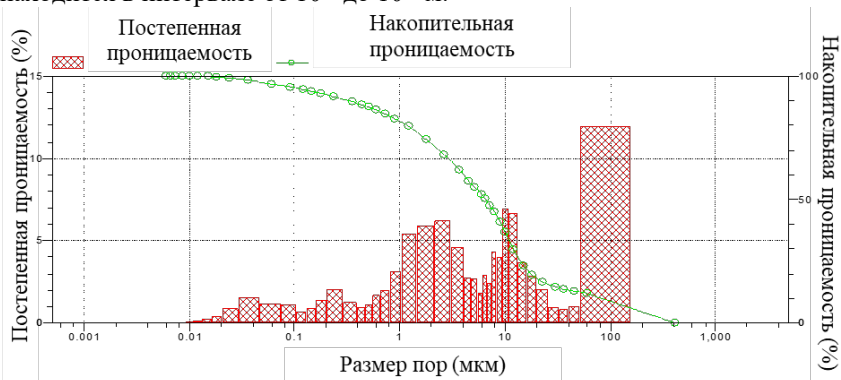


Рисунок 1 – Диаграмма распределения размеров пор в керамическом кирпиче

Указанные параметры порового пространства защитного раствора могут быть получены за счет использования в качестве вяжущего портландцемента, в структуре которого формируется сеть капилляров переменного сечения размерами от 10^{-9} до 10^{-4} м. Однако цементный камень обладает

низкой паропроницаемостью, что препятствует выходу избыточной влаги в окружающую среду в виде водяного пара. Поэтому для регулирования параметра паропроницаемости целесообразно использовать смешанное цементно-известковое вяжущее. Необходимое количество извести в составе смешанного вяжущего определялось путем оценки влияния ее расхода на такие показатели как паропроницаемость, капиллярное водопоглощение и параметры пористости (показатель среднего размера капиллярных пор и показатель однородности размеров открытых капиллярных пор).

Как видно из экспериментальных данных (рис. 2), введение в состав цементно-песчаной смеси извести-пушонки в количестве от 3% до 9% от массы портландцемента сопровождается увеличением паропроницаемости на 10–70%, что согласуется с повышением показателя среднего размера капиллярных пор по мере возрастания доли извести.

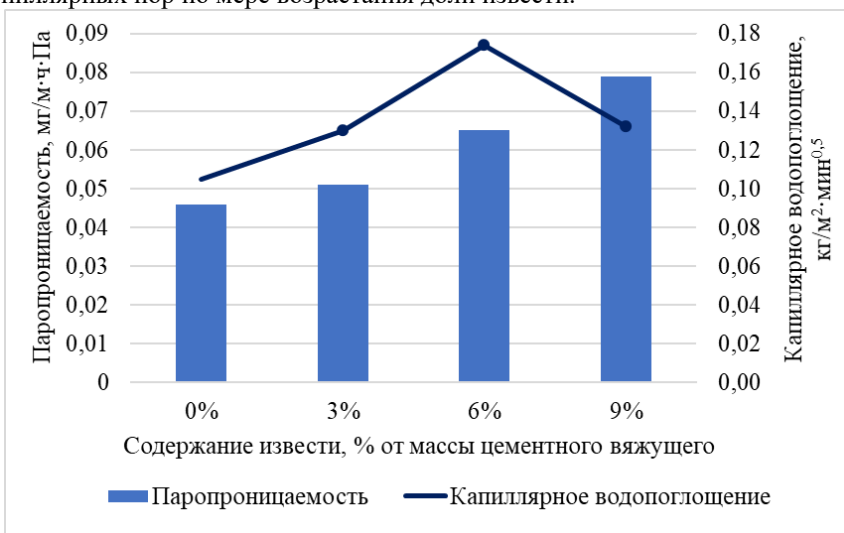


Рисунок 2 – Влияние добавки извести на паропроницаемость и капиллярное водопоглощение цементно-песчаного раствора

Изменение капиллярного водопоглощения характеризуется наличием экстремума в исследованном диапазоне расхода известкового вяжущего. Наибольший прирост капиллярного поглощения (на 65%) достигается при введении 6% извести от массы цемента. Данный факт обусловлен равномерным распределением пушонки в объеме растворной смеси с формированием оптимальной структуры капиллярных пор: показатель однородности размеров открытых капиллярных пор имеет наибольшее значение. Увеличение содержания извести до 9% вызывает снижение капиллярного водопоглощения, что обусловлено повышением среднего размера капиллярных пор.

Основываясь на полученных данных подобран базовый состав saniрующего раствора (табл. 1), обеспечивающий прочность, сопоставимую с прочностью кладки, технологичность, высокие капиллярное водопоглощение и паропроницаемость (табл. 2).

Таблица 1 – Состав базового saniрующего раствора

Компонент	Расход, % массы смеси
ПЦ ЦЕМ I, 42,5 Н ГОСТ 31108	16
Гидратная известь 1 сорт ГОСТ 9179	1
Микрокальцит КМ-100 ГОСТ Р 56775	5
Строительный песок фракции 0-2,5 мм ГОСТ 8736	78

Таблица 2 – Физико-механические характеристики базового saniрующего состава

Физико-механические характеристики	Значение
Водоудерживающая способность, %	95
Средняя плотность раствора $\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	2132
Прочность при сжатии, МПа	19,2
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,075
Прочность сцепления (адгезия) раствора с основанием, МПа	0,5

Методом ртутной порометрии установлено распределение пор по размерам в структуре базового раствора (рис. 3). Большинство из них имеет размеры от 10^{-8} до 10^{-6} м, что соответствует условию формирования проводящей структуры и подтверждает возможность перехода солевого раствора в капилляры saniрующего материала, полученного на основе цементно-известкового вяжущего.

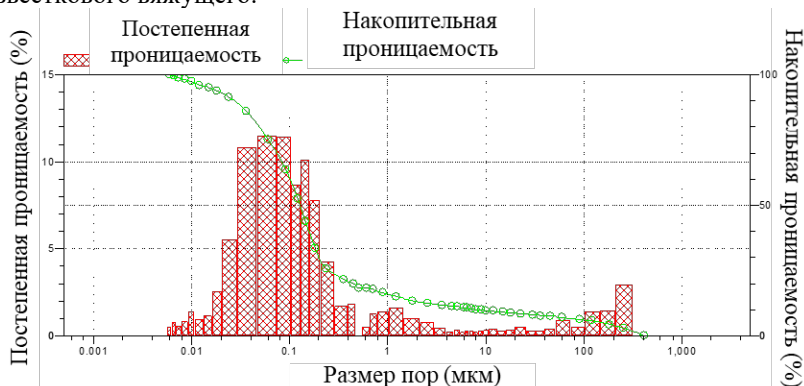


Рисунок 3 – Диаграмма распределения размеров пор в цементно-известковом растворе

3. Критерии качества saniрующих штукатурных растворов, применяемых при однослойном нанесении.

Согласно механизму действия saniрующей штукатурки ее защитная функция заключается в способности поглощать и удерживать в своей структуре солевые растворы за счет их миграции из кирпичной кладки.

Отсутствие единых требований, закреплённых в нормативно-технической документации к saniрующим растворам, обуславливает необходимость выявления критериев качества, которые позволят установить возможность, как перехода, так и блокирования солевых растворов в штукатурном слое.

Оценить способность saniрующих покрытий поглощать и транспортировать водные растворы солей можно рассмотрев такие показатели как поверхностное и капиллярное поглощения. Поверхностное поглощение определяет впитывающую способность поверхностного слоя штукатурного покрытия, прилегающего к кирпичной кладке, что влияет на процесс миграции водных растворов солей. Капиллярное поглощение способствует движению этих растворов в объеме saniрующего материала за счет действия капиллярных сил, тем самым увеличивая поверхность испарения избыточной влаги и обеспечивая условия для кристаллизации солей.

В проводимом исследовании модифицирована методика определения капиллярного поглощения, изложенная в ГОСТ Р 58277-2018. Так как saniрующие штукатурки поглощают водные растворы солей, необходимо установить влияние среды насыщения на изменение величины капиллярного поглощения. Для этого проведен сравнительный анализ трех различных составов (рис. 4) на основе кварцевого песка и цементно-известкового вяжущего с добавками пористых заполнителей для повышения поглощающей способности испытываемых образцов, которые насыщались в воде и водном растворе NaCl 5%-ной концентрации.

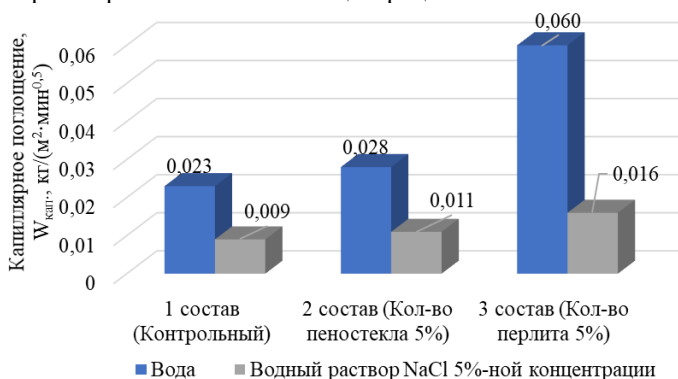


Рисунок 4 – Сравнительный анализ величин капиллярного поглощения при насыщении образцов водой и водным раствором NaCl

При испытании рассматриваемых составов в растворе NaCl отмечается снижение капиллярного поглощения в отличие от образцов, испытываемых в воде. Для состава 1 интенсивность капиллярного поглощения сокращается на 60%. Для составов 2 и 3, в которых часть песка замещена пористыми заполнителями, рассматриваемый параметр снижается на 63% и 74% соответственно. Подобное сокращение величины капиллярного поглощения обусловлено разной плотностью веществ, в которых испытывались образцы: чем выше плотность жидкости, тем ниже капиллярная сорбция. Таким образом, для моделирования более точных условий работы saniрующих растворов при оценке капиллярного поглощения представляется целесообразным использовать солевые растворы.

Для оценки возможности поглощения saniрующими покрытиями солевых растворов рассматривалась методика, основанная на применении специального прибора – трубки Карстена, позволяющая смоделировать механизм перемещения водных растворов солей в штукатурный слой с наибольшим соответствием физическому принципу взаимодействия элементов. Поверхностное поглощение определяется на образцах с линейными размерами 100×100×30 мм, к поверхности которых герметично крепится трубка Карстена и заполняется водным раствором NaCl 5%-ной концентрации до нулевой отметки. Затем в течение 30 минут отслеживают изменение уровня жидкости и определяют объем впитавшегося солевого раствора.

Вычисление величины поверхностного поглощения $W_{\text{пов.}}$, м/мин^{0,5} производят по предложенной ниже формуле (1):

$$W_{\text{пов.}} = K \cdot V, \quad (1)$$

где: V – объем солевого раствора NaCl, поглощаемого в течение принятого времени испытания, м³; K – коэффициент поверхностного поглощения, вычисляемый по формуле (2):

$$K = 1 / (S \sqrt{t}), \quad (2)$$

где: S – площадь поглощения, м², определяемая по величине внутреннего диаметра колокола трубки Карстена, t – время проведения эксперимента равное 30 мин.

4. Регулирование параметров структуры saniрующих штукатурных смесей для блокирования солевых растворов путем применения пористых заполнителей.

Для обеспечения способности saniрующих покрытий удерживать в своей структуре солевые растворы необходимо ограничить скорость капиллярного впитывания внутри штукатурного слоя и сформировать в поровом пространстве достаточное количество пор для свободной кристаллизации солей. Добиться этого возможно за счет введения в базовый

цементно-известковый раствор добавок в виде пористых мелкозернистых заполнителей, в качестве которых приняты перлитовый песок и гранулированное пеностекло.

Выбранные заполнители имеют выраженные структурные различия. Зерна перлита характеризуются преимущественно порами открытого типа размером от 10^{-5} м до 10^{-3} м (рис. 5) и обладают высокой поглощающей способностью. Гранулы пеностекла, напротив, отличаются низкой водопотребностью за счет преобладания в структуре замкнутых пор, размером от 10^{-8} до 10^{-6} м (рис. 6).

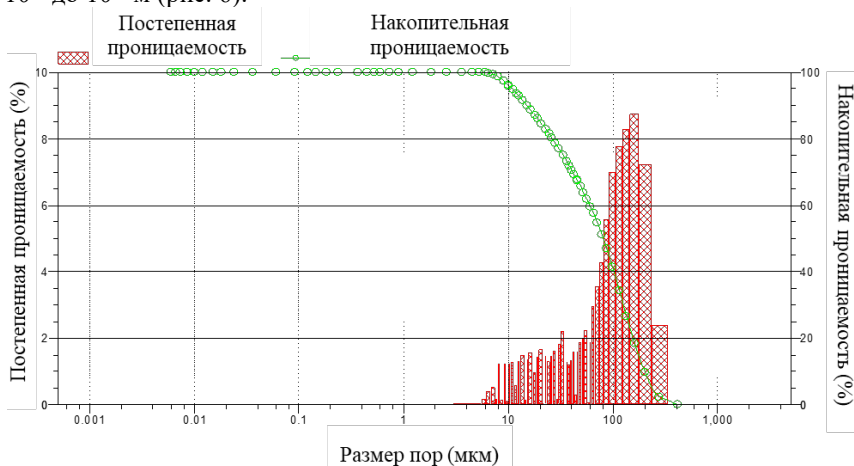


Рисунок 5 – Диаграмма распределения размеров пор в зернах перлитового песка

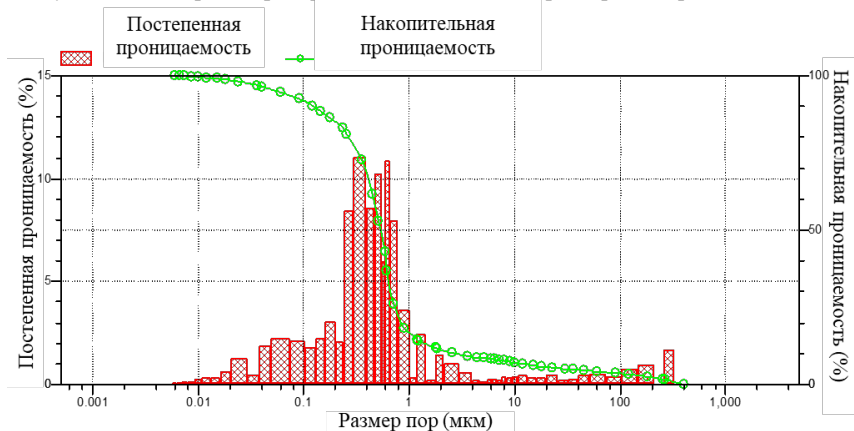


Рисунок 7 – Диаграмма распределения размеров пор в гранулах пеностекла

Предполагается, что встраиваясь в цементно-известковую матрицу базового раствора пористые заполнители будут способствовать прерыванию

сквозных связей в хаотичной системе образующихся капилляров (рис. 7). Следовательно, будут сдерживать капиллярный транспорт солевых растворов к лицевой поверхности отделки. Достигается подобный эффект за счет разности размеров пор в структуре перлитового песка и растворной матрице, а также за счет несмачиваемой поверхности гранул пеностекла.

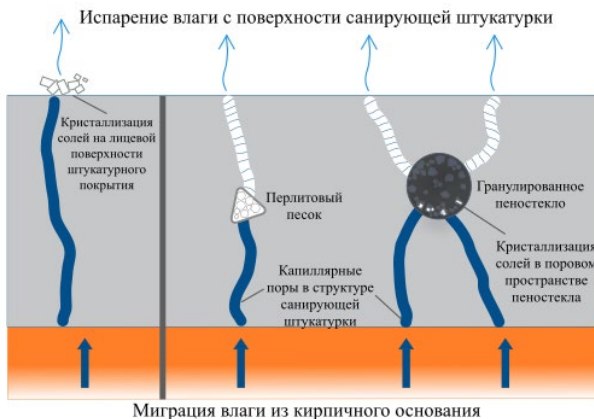


Рисунок 7 – Схематическое отражение влияния пористых заполнителей на механизм работы санитизирующего раствора

Проверка высказанных предположений осуществлялась путем проведения двухфакторного трехуровневого эксперимента, где в качестве рассматриваемых факторов приняты расходы пористых заполнителей в % от объема песка. Получены экспериментально-статистические модели для таких параметров, как капиллярное и поверхностное поглощения, предел прочности при сжатии, средняя плотность и солестойкость.

С точки зрения механизма санирования наибольший интерес представляют результаты влияния пористых заполнителей на изменение капиллярного и поверхностного поглощений. Установлено, что в исследуемом диапазоне расхода перлита повышение поверхностного поглощения составляет 8%, что вероятно обусловлено высокой сорбционной активностью материала. При введении гранулированного пеностекла данный параметр снижается на 28% (рис. 8).

Капиллярное поглощение с увеличением доли перлита снижается на 17%, что подтверждает гипотезу о том, что зерна заполнителя выступают естественным барьером, ограничивающим движение солевых растворов. При этом гранулированное пеностекло дает обратный эффект – капиллярное поглощение повышается до 7% (рис. 9). Это говорит о том, что в структуре пеностекла имеется достаточное количество открытых пор, через которые обеспечивается капиллярный транспорт солевых растворов.

Следовательно, данный наполнитель малоэффективен как регулятор капиллярного движения внутри штукатурного покрытия. Однако наблюдаемый эффект может оказать положительное действие с точки зрения обеспечения солестойкости, что подтверждено экспериментально. Составы, содержащие гранулированное пеностекло, показывают наилучшие результаты по солестойкости, что обусловлено заполнением большего объема пор, формируемых в структуре санирующего материала и доступных для накопления солевых отложений.

$$W_{\text{пов.погл.}} = 0,167 - 0,001X_1 - 0,025X_2 - 0,005X_1^2 + 0,022X_2^2 - 0,006X_1X_2$$

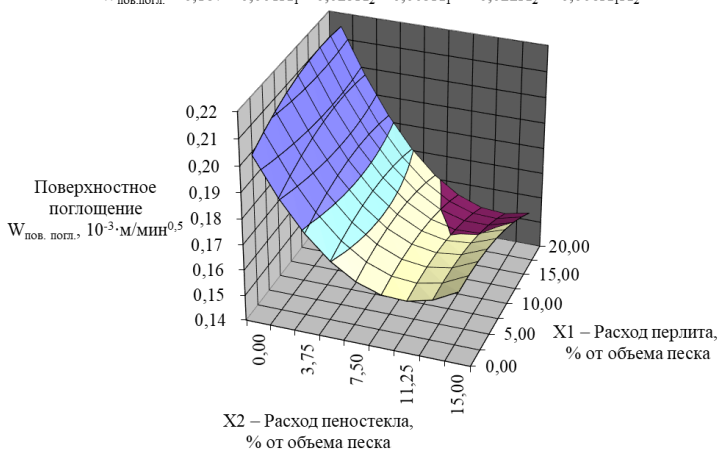


Рисунок 8 – Зависимость поверхностного поглощения санирующих составов от расхода пористых заполнителей

$$W_{\text{кап.погл.}} = 0,210 - 0,014X_1 + 0,002X_2 - 0,011X_1^2 - 0,003X_2^2 - 0,003X_1X_2$$

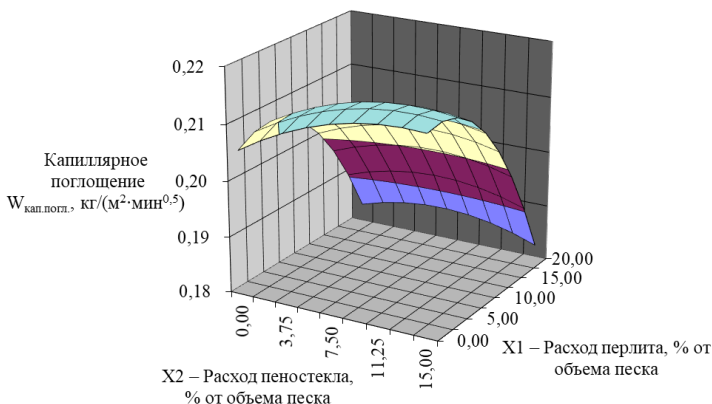


Рисунок 9 – Зависимость капиллярного поглощения санирующих составов от расхода пористых заполнителей

Таким образом, использование пористых заполнителей позволяет придать штукатурным растворам санирующие свойства за счет формирования требуемых параметров пористости. Перлитовый песок влияет на впитывание солевых растворов, сдерживая их движение в структуре материала, но при этом не обеспечивает дополнительное пространство для накопления солевых отложений. Гранулы пеностекла, напротив, формируют необходимый объем пустот, который может быть заполнен солями. Поэтому защитные свойства санирующих покрытий могут быть обеспечены путем введения в их состав как одного перлита, так и смеси перлита с пеностеклом.

5. Разработка метода проектирования составов сухих санирующих штукатурных смесей, учитывающего изменчивость характеристик заполнителей и степень засоленности кладки.

В целях установления количества перлитового песка и гранулированного пеностекла, при котором обеспечивается эффективное блокирование солей в объеме санирующего раствора предложен структурный критерий n , представляющий собой отношение объема блокирующих пор (размером $>10^{-6}$ м) в зернах заполнителя к объему цементно-известкового камня:

$$n = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}}{V_{\text{цк}}} \quad (3)$$

Сопоставляя значения структурных критериев с величинами поверхностного и капиллярного поглощений, получена графическая зависимость (рисунок 10), позволяющая установить при каком количестве пористых заполнителей достигаются наилучшие условия для поглощения и блокирования водорастворимых минералов.

Наиболее эффективным, с точки зрения санирования, будет штукатурный раствор, который обладает высоким поверхностным поглощением и малым капиллярным. Согласно полученной зависимости, среди исследуемых санирующих смесей выбраны два состава, удовлетворяющие данному условию (табл. 3).

Таблица 3 – Характеристики составов для эмпирической оценки защитных свойств санирующих смесей

Показатели	Вариант 1 Перлит 20%	Вариант 2 Перлит 20% Пеностекло 7,5%
Капиллярное поглощение $W_{\text{кап.}}$, кг/(м ² ·мин ^{0,5})	0,186	0,181
Поверхностное поглощение $W_{\text{пов.}}$, 10 ⁻³ м/мин ^{0,5}	0,211	0,166
Структурный критерий n	0,63	0,71

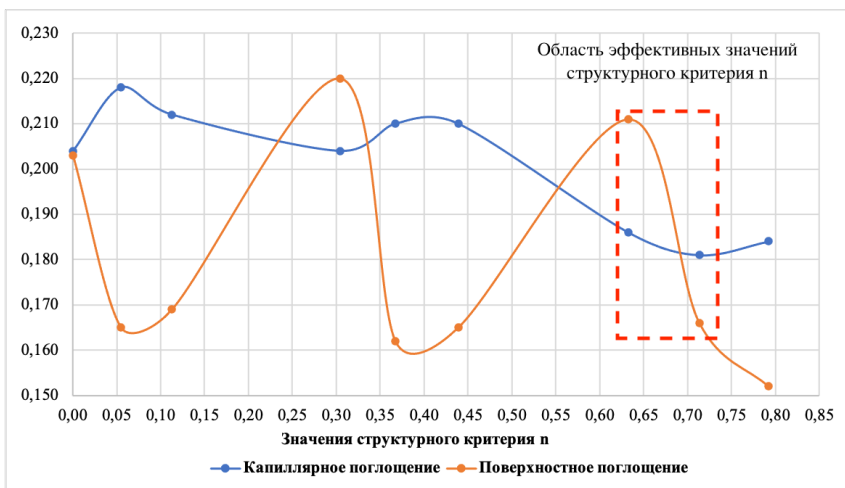


Рисунок 11 – Графическая зависимость между структурным критерием n , поверхностным и капиллярным поглощением

Защитные свойства выбранных составов оценивались посредством проведения физического эксперимента, ориентированного на воспроизведение сверх экстремальных условий эксплуатации. Физическая модель представляла собой стандартный полноразмерный керамический кирпич ($250 \times 120 \times 65$ мм), на постель которого наносились штукатурные составы толщиной 30 мм. Кирпич погружался в ванну с 5% раствором NaCl на глубину 15 мм. Продолжительность эксперимента составляла 14 дней. По истечении установленного срока образцы обследовались на наличие высолов. После чего проводился рентгеноспектральный анализ с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH, оснащенного рентгеноспектральным анализатором для установления концентрации Cl в объеме материала.

По результатам обследования на лицевых поверхностях исследуемых штукатурных составов образование высолов не зафиксировано. На основании рентгеноспектрального анализа установлено, что для «Варианта 1» наибольшая концентрация Cl в объеме материала наблюдается на расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича и составляет 1,89%. Для «Варианта 2» локализация Cl происходит на расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича и составляет 1,52%, что обусловлено влиянием пеностекольных гранул.

Исходя из полученных результатов «Вариант 1» может быть рекомендован для устройства покрытий на основаниях с низкой степенью засоленности. В то время как «Вариант 2» будет более эффективен в тех случаях, когда кирпичная кладка подвержена постоянному или периодическому

притоку влаги и характеризуется средней или высокой степенью засоленности.

На основании установленных структурных критериев предложен метод расчета составов сухих санирующих смесей (формулы 4–11), позволяющий учесть колебания насыпной плотности перлитового песка и гранулированного пеностекла, которые будут оказывать влияние на формирование структуры штукатурного раствора, ухудшая эффективность блокирования солей.

Для сухой смеси на основе перлитового песка, данные выражения имеют следующий вид:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n \cdot V_{\text{цк}} \quad (4)$$

$$V_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}}{\alpha} \quad (5)$$

$$m_{\text{перлита}} = V_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{нас.}} \quad (6)$$

где: n – структурный критерий, равный 0,63; α – доля «блокирующих» пор в перлите ($\alpha = 0,67$); $\rho_{\text{нас.}}$ – насыпная плотность перлитового песка, кг/м³.

Для санирующей смеси, содержащей в своем составе перлитовый песок и гранулированное пеностекло, расчет производится по следующим формулам:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n' \cdot V_{\text{цк}} \quad (7)$$

$$V'_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \varphi}{\alpha} \quad (8)$$

$$V_{\text{пеностекла}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \gamma}{\beta} \quad (9)$$

$$m'_{\text{перлита}} = V'_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{нас.}} \quad (10)$$

$$m_{\text{пеностекла}} = V_{\text{пеностекла}} \cdot \rho_{\text{нас.}} \quad (11)$$

где n' – структурный критерий, равный 0,71; β – доля «блокирующих» пор в пеностекле ($\beta = 0,16$); φ – доля перлита в составе смеси, равная 0,917; γ – доля пеностекла в составе смеси, равная 0,083; $\rho_{\text{нас.}}$ – насыпная плотность заполнителя, кг/м³.

6. Апробация результатов проведенных исследований в производственных условиях и оценка технико-экономической эффективности разработанных составов.

Основываясь на разработанном алгоритме расчета состава сухой санирующей смеси вычислены рабочие рецептуры (табл. 4) и произведена оценка себестоимости производства 1 тонны двух видов смесей (табл. 5),

соответствующих «Варианту 1» (без пеностекла) и «Варианту 2» (совместное применение пеностекла и перлита) п. 5.

Следует отметить, что себестоимость разработанных составов сухих санирующих смесей существенно ниже по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами, предполагающими многослойное нанесение, что определяет их экономическую эффективность. Для оснований с низкой степенью засоленности экономический эффект при однослойном нанесении «Смеси 1», выражается в снижении стоимости материалов в 2,3 раза по сравнению с отечественным аналогом и в 9,3 раз в сравнении с зарубежным. Для кирпичных кладок со средней или высокой степенью засоленности экономический эффект при однослойном нанесении предлагаемой «Смеси 2» в сравнении с многослойными системами отечественного и зарубежного производства приводит к сокращению стоимости материалов в 1,9 и 17,2 раза, соответственно.

Таблица 4 – Составы сухих смесей

Компонент	Расход, кг, на тонну сухой смеси	
	Смесь 1	Смесь 2
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	190	206
Гидратная известь	12	13
Микрокальцит КМ-100	60	64
Строительный песок 0-2,5 мм	728	694
Перлитовый песок М75	11	12
Гранулированное пеностекло	-	12

Таблица 5 – Расход и стоимость компонентов для изготовления 1 тонны сухих санирующих смесей

Компонент	Стоимость с НДС, руб/кг (на 06.2024)	Стоимость в составе, руб.	
		«Смесь 1»	«Смесь 2».
1	2	3	4
Портландцемент	10	$190 \cdot 10 = 1900,0$	$206 \cdot 10 = 2060$
Гидратная известь	9,43	$12 \cdot 9,43 = 113,16$	$13 \cdot 9,43 = 122,59$
Микрокальцит КМ-100	10,33	$60 \cdot 10,33 = 619,80$	$66 \cdot 10,33 = 661,12$
Строительный песок	2	$728 \cdot 2 = 1456$	$694 \cdot 2 = 1388$
Перлитовый песок М75	104,65	$11 \cdot 104,65 = 1151,15$	$12 \cdot 104,65 = 1255,8$

Окончание таблицы 5

1	2	3	4
Гранулированное пеностекло	124,63	-	$12 \cdot 124,63 = 1495,56$
Накладные расходы с учетом прибыли в 20%		13100,28	17457,68
Упаковка		$40 \cdot 26,69 = 1067,60$	$40 \cdot 26,69 = 1067,60$
Поддон		280	280
Стрейч-лента машинная		50,4	50,4
Изготовление		1000	1000
Итого стоимость тонны:		20738,39	26838,75
Итого стоимость 1 упаковки (25 кг):		518,46	670,97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Процесс санирования при нанесении однослойных штукатурных покрытий заключается в обеспечении естественного перехода водных растворов солей из кирпичной кладки в структуру защитного слоя с последующим блокированием солевых отложений в его объеме. Установлено, что естественный переход достигается при условии, когда размеры пор в растворной матрице санирующего материала меньше, чем поры в керамическом кирпиче и находится в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-6} м. Показано, что требуемая структура пор обеспечивается в цементной матрице, содержащей добавку гидратной извести в количестве 6% от массы цемента.

Для блокирования солевых отложений требуется создать в структуре санирующей штукатурки достаточное количество условно-замкнутых пор размером свыше 10^{-6} м. Установлено, что для технологии сухих смесей регулирование параметров условно-замкнутой пористости наиболее рационально осуществлять на основе применения перлитового песка и гранулированного пеностекла.

2) Показана необходимость включения в систему критериев качества санирующих штукатурных растворов, применяемых при однослойном нанесении, таких параметров, как капиллярное и поверхностное поглощения. Определяемые при поглощении 5%-го водного раствора NaCl, указанные параметры позволяют количественно охарактеризовать способность материала обеспечивать естественный переход солей из кладки и их блокирование в защитном слое.

3) Установлено, что введение перлитового песка, обладающего преимущественно порами открытого типа размером от 10^{-5} до 10^{-3} м, влияет на процессы впитывания и миграции солевых растворов в структуре санирующего покрытия, улучшая условия выхода солей из кирпичной кладки и не допуская их появления на лицевой поверхности отделочного слоя. Введение гранул пеностекла, имеющих в своей структуре поры, размер которых

изменяется от 10^{-8} до 10^{-6} м, позволяет сформировать необходимый объем сферических пустот для безопасного накопления солевых отложений в штукатурном слое.

4) Разработан метод проектирования составов сухих санирующих смесей, основанный на использовании структурного критерия n , характеризующего соотношение условно-замкнутой и капиллярной пористости в штукатурном санирующем растворе. Установлены значения критерия (0,63–0,71), соответствующие количеству пористых заполнителей, при котором обеспечиваются условия для блокирования солевых отложений в структуре защитного покрытия в зависимости от насыпной плотности заполнителя и степени засоленности кладки.

5) На основании проведенных исследований разработаны производственные рецептуры сухих санирующих смесей, способных предотвратить образование высолов на поверхности штукатурного покрытия при однослойном нанесении на засоленные кирпичные кладки. Подтверждена эффективность санирующего состава в рамках проведения реставрационных работ.

Перспективы дальнейших исследований:

Расширение сырьевой базы пористых заполнителей, применяемых в составе санирующих штукатурок, изготовленных по технологии сухих строительных смесей, с целью повышения эффективности защитных составов.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Старцев, С.А. Оценка степени влияния капиллярного подсоса на увлажнение кирпичной кладки / С.А. Старцев, А.М. Харитонов, **М.В. Ступак**, А.С. Чиркин // Инновации и инвестиции. – 2021. – №4. – С. 293-297.
2. Харитонов А.М. Санирующие сухие смеси: требования к материалу и особенности подбора состава / А.М. Харитонов, **М.В. Ступак**, Т.А. Иванова // Цемент и его применение. – 2022. – №1. – С. 114-116.
3. **Ступак, М.В.** Анализ методик экспериментальных исследований санирующих штукатурок / М.В. Ступак // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2022. - №4 (69). – С. 14-19.
4. **Ступак, М.В.** Критерии эффективности при проектировании составов сухих санирующих смесей / М.В. Ступак // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – №2(97). – С. 75-83.

Патенты

5. Патент № 2835651 РФ, МПК C04B 41/85, C04B 28/02, C04B 14/18, C04B 14/24. Строительная сухая штукатурная смесь для защиты кирпичной

кладки от солевой коррозии / Шангина Н.Н., Харитонов А.М., **Ступак М.В.**; заявитель и патентообладатель ООО «Рунит». – 2024117716; заявл. 02.08.2024; опубл. 03.03.2025, Бюл. №7.

Публикации в других изданиях:

6. **Ступак, М.В.** Принципы разработки составов saniрующих штукатурок / М.В. Ступак // Современные перспективы строительства: сборник научных статей по материалам Молодежной научной школы (БФУ им. И. Канта), Калининград, 2023. С. 39-48.

7. **Ступак, М.В.** Формирование saniрующих свойств растворов на основании применения смеси пористых заполнителей / М.В. Ступак // Сборник материалов национальной (всероссийской) научно-технической конференции «Перспективы современного строительства», СПбГАСУ – СПб., 2023. С. 421-431.

8. **Ступак, М.В.** Определение ключевых показателей качества saniрующих штукатурок / М.В. Ступак // Сборник научных трудов по материалам XI Международной научно-практической конференции «Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе», СГТУ – Саратов., 2023. С. 61-67.

9. **Ступак, М.В.** Оценка эффективности пористых заполнителей в составе saniрующих штукатурок / М.В. Ступак // Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск., 2023. С. 281-288.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 28.03.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 35.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А