

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Ступак Мария Васильевна

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

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент А.М. Харитонов

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. САНИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ И УВЛАЖНЕННЫХ КИРПИЧНЫХ КЛАДОК	12
1.1 Механизмы разрушения кирпичных кладок солями.....	13
1.2 Виды солей и источники их поступления в кладку.....	17
1.3 Санирующая штукатурка как элемент защиты от солевой коррозии	21
Выводы по первой главе	32
2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	33
2.1 Сырьевые материалы, применяемые в экспериментальном исследовании	33
2.1.1 Портландцемент	33
2.1.2 Гидратная известь	33
2.1.3 Песок строительный.....	33
2.1.4 Микрокальцит	34
2.1.5 Пористые заполнители	34
2.1.6 Керамический кирпич.....	36
2.2 Оборудование, применяемое в исследовании.....	37
2.3 Планирование эксперимента и технология изготовления образцов.....	38
2.3.1 Метод планирования эксперимента.....	38
2.3.2 Технология изготовления образцов	39
2.4 Методы испытаний	40
2.4.1 Определение технологических свойств растворной смеси и физико- механических свойств затвердевшего раствора.....	41
2.4.2 Определение капиллярного и поверхностного поглощений затвердевшего раствора.....	41
2.4.3 Определение величины солестойкости затвердевшего раствора.....	44

Выводы по второй главе	45
3. ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЗАЩИТЫ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ САНИРУЮЩИМИ РАСТВОРАМИ	47
3.1 Факторы, определяющие капиллярный переход жидкой фазы из керамического кирпича в saniрующий раствор.....	47
3.2 Формирование структуры базового состава saniрующего раствора, обеспечивающего проводящую функцию.....	53
3.3 Регулирование капиллярной проводимости saniрующего раствора.....	58
Выводы по третьей главе	67
4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ САНИРУЮЩИХ ШТУКАТУРНЫХ СМЕСЕЙ	69
4.1 Планирование двухфакторного трехуровневого эксперимента	69
4.2 Количественная оценка влияния пористых заполнителей на ключевые эксплуатационные характеристики растворов.....	70
4.3 Оценка эффективности защитных свойств saniрующих составов	81
4.4 Метод проектирования состава сухой saniрующей смеси с учетом свойств пористых заполнителей.....	89
Выводы по четвертой главе	91
5. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СУХИХ САНИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ	92
5.1 Оценка технико-экономической эффективности разработанных сухих saniрующих смесей.....	95
5.2 Опытнo-промышленные испытания сухой saniрующей смеси.....	97
Выводы по пятой главе.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	117
Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа	118
Приложение Б – Акт о внедрении	124
Приложение В – Патент на изобретение РФ №2835651 «Строительная сухая штукатурная смесь для защиты кирпичной кладки от солевой коррозии»	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. 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 saniрования, 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.

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.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного технологического решения, направленного на получение saniрующего 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 saniрующих растворов по отношению к солевой коррозии, и определить базовый состав saniрующей штукатурной смеси;
3. Исследовать закономерности влияния смеси пористых заполнителей на формирование структуры и защитных свойств saniрующих растворов;
4. Разработать метод проектирования составов сухих saniрующих смесей для защиты кирпичных кладок от солевой коррозии;
5. Произвести опытно-промышленную апробацию, разработанных saniрующих 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 г.).

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 saniрующих смесей, позволяющий учитывать изменение свойств пористых заполнителей.

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

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

1. САНИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ И УВЛАЖНЕННЫХ КИРПИЧНЫХ КЛАДОК

Повреждение каменных конструкций вследствие воздействия влаги и водорастворимых солей известно еще с древнейших времен. Так, древнегреческий историк Геродот отмечал, что «соль выделяется из почвы до такой степени, что может повредить пирамиды» [104], а древнеримский архитектор Витрувий в своем трактате [14] изложил принципы проведения штукатурных и отделочных работ в «сырых» помещениях. Таким образом, уже с древности строители сталкивались с отрицательными последствиями солевой коррозии и разрабатывали первые решения, направленные на предотвращение распространения влаги и солевых образований на стенах зданий.

Многовековой опыт, накопленный строителями до наступления новой эпохи, часто не принимался во внимание при возведении каменных кладок в Средние века и позднее, что приводило к появлению повреждений из-за совместного воздействия влаги и солей. Вплоть до XIX века проблема негативного влияния растворимых солей на каменные конструкции не была освещена. И лишь во второй половине указанного столетия вышли в свет первые публикации зарубежных и отечественных ученых [28], ставящие вопросы защиты зданий и сооружений от солевой коррозии. С течением времени данный вопрос набирал актуальность, что привело к появлению фундаментальных исследований, посвященных проблеме солевой коррозии керамических материалов. Вместе с тем научные разработки по устранению повреждений кирпичных кладок и отдельных ее элементов, в результате воздействия водорастворимых солей, внедрялись в строительную практику менее стремительно.

Поскольку кладка как элемент строительной технологии не потеряла своей актуальности и в настоящее время, значимость исследований, направленных на выявление способов нейтрализации деструктивного воздействия водорастворимых солей и влаги, продолжает оставаться высокой, особенно в связи с необходимостью продления эксплуатационного ресурса зданий и сооружений.

1.1 . Механизмы разрушения кирпичных кладок солями

В общем случае принято считать, что присутствие растворимых солей - одна из причин разрушения каменных конструкций, возводимых из керамического кирпича. Однако, ухудшение состояния кирпичной кладки, обусловлено не только присутствием солей, но также наличием избыточной влаги, капиллярно-пористой структурой материала и условиями окружающей среды [20, 69, 76, 99, 100, 102, 103, 104]. Совокупность данных факторов определяет механизмы деструктивных процессов в каменной кладке.

Соли негативно воздействуют на каменные конструкции только при условии растворения в воде и последующей миграции солевых растворов в капиллярно-пористой системе материала. Поэтому вопросы, связанные с источниками увлажнения и механизмами переноса влаги в кирпичных кладках имеют решающее значение для понимания процессов разрушения пористых материалов солями.

Известно, что в каменных конструкциях керамический кирпич никогда не бывает в абсолютно сухом состоянии, а имеет некоторую влажность как результат сорбции и конденсации водяных паров, содержащихся в воздухе. В условиях нормальной эксплуатации конструкций содержание влаги колеблется от 1,5% до 2% [3, 59, 82]. Однако нарушение данных условий приводит к повышению влажности кирпичной кладки [11]. Если одновременно с этим в ней присутствуют растворимые соли, развитие коррозии неизбежно. Установлено, что критическое значение влажности керамического кирпича, при котором соли негативно воздействуют на каменную кладку, находится в диапазоне от 3 до 5% [28].

Увлажнение каменной кладки может происходить по различным причинам, поскольку вода способна проникать в структуру керамического кирпича в различных фазовых состояниях [60]. Образование жидкой фазы водяных паров на поверхности конструкции и в ее толще происходит в результате конденсации влаги. Как правило, данное явление возникает из-за теплового перепада между воздухом и поверхностью каменной кладки, но также может быть вызвано

наличием паронепроницаемой преграды или теплопроводного включения в наружной стене [76, 114].

Сорбционное увлажнение кирпичной кладки обусловлено способностью материала поглощать водяные пары из окружающей среды, и в большей степени зависит от величины относительной влажности воздуха. Керамический кирпич отличается достаточно низкой сорбционной способностью [44]. Однако в присутствии растворимых солей, благодаря их высокой гигроскопичности, повышается сорбционная активность материала, что приводит к увеличению влажности кладки [25, 60]. В случае, когда соли отличаются высокой степенью растворимости, они могут поглотить такое количество водяного пара, которое приведет к образованию насыщенного солевого раствора, способного мигрировать в капиллярно-пористой системе керамического кирпича [83, 103].

Поглощение и перенос воды в жидком состоянии происходит в результате действия капиллярных сил при непосредственном контакте материала с источником влаги. Это может быть замачивание атмосферными осадками либо просачивание грунтовых и технологических вод при наличии дефектов кровли, гидроизоляции, систем наружных водоотводов, повреждений отмостки, а также в результате повышения культурного слоя, утечек трубопроводов и т.д. [8, 28, 57, 66, 68, 76, 98, 99, 100, 109, 112, 113, 118].

Независимо от того, каким способом влага проникает в структуру кирпичной кладки ее дальнейшее перемещение, а следовательно, и перемещение водных растворов солей будет определяться пористостью материала и условиями окружающей среды.

Капиллярное всасывание является одним из основных механизмов транспорта влаги в кладке [94]. Данный процесс обусловлен размером пор и их геометрией. Влага способна проникать в структуру материала только через открытые капиллярные поры радиусом от 10^{-7} до 10^{-4} м. Именно в этом диапазоне наиболее отчетливо проявляется капиллярное давление, что способствует поглощению влаги и ее дальнейшей миграции в теле кирпича. В порах, размер которых составляет менее 10^{-7} м капиллярные явления невозможны, влага способна

проникать в них только в виде пара. Для пор, радиус которых превышает 10^{-4} м характерно снижение капиллярных сил, поэтому вода может поступать в них при наличии давления в жидкой форме [62, 83].

Капиллярно-пористая структура керамического кирпича способствует интенсивной миграции влаги в кирпичной кладке. Вместе с влагой активно мигрируют соли. Попадая в кирпич в процессе изготовления из применяемого сырья и растворяясь под действием влаги, либо проникая в материал при эксплуатации в результате воздействия грунтовых или атмосферных вод, растворы солей пронизывают систему пор и капилляров кирпичной кладки [32]. В условиях изменяющегося температурного режима и относительной влажности окружающей среды в теле кирпича и на его поверхности начинают происходить процессы попеременного увлажнения и высыхания, что приводит к появлению кристаллических солевых образований как на поверхности кладки, так и в порах материала [11, 23, 28, 30, 59, 79, 94, 103, 108, 111].

Соли стремятся к образованию своей энергетически устойчивой модификации – кристаллогидрату с наибольшим количеством кристаллизационной воды, поэтому миграция водных растворов солей идет навстречу влаге, ненасыщенной солями. Если поток водных растворов солей достаточно высок, то он достигает внешней поверхности стены и испаряется. В результате на кирпичной кладке можно наблюдать солевые разводы, именуемые в технической литературе термином «высолы» [28, 97, 99, 104, 107].

Считается, что образование высолов неприемлемо с эстетической точки зрения, но безвредно с технической [83, 102, 110]. В действительности, изредка данное явление можно рассматривать как наносящее незначительный ущерб кирпичной кладке. В большинстве случаев это трудно устранимые скопления кристаллов солей, которые после промывания или механической очистки образуются вновь при увеличении влажности воздуха [83]. Со временем это может привести к прогрессированию коррозионных процессов, сопровождающихся разрушением поверхностных слоев керамического материала.

Помимо вышеперечисленного, высолы наносят значительный ущерб, когда на поверхности кирпичной кладки присутствуют отделочные слои. В данном случае кристаллизация солей будет происходить в контактной зоне между основанием и отделочным материалом, что приведет к снижению адгезионной прочности, отслоению и повреждению отделки.

Следует отметить, что появление высолов является не только поверхностным повреждением кирпичной кладки, но и прямым признаком протекания коррозионных процессов внутри керамического материала. Когда движение водных растворов солей медленнее, чем скорость испарения, кристаллизация последних происходит внутри порового пространства кирпича.

Тенденция к накоплению солевых растворов в порах кирпича приводит к глубинным повреждениям вследствие возникновения кристаллизационного давления [33, 113, 116]. Образование кристаллов солей сопровождается увеличением объема твердой фазы. В результате последующий рост солевых отложений приводит к тому, что их количество не может быть компенсировано объемом пор и пустот. Создается внутреннее напряжение, действующее на стенки пор и значительно превышающее прочностные свойства строительного кирпича, что вызывает разрушение каркаса материала.

Помимо кристаллизационного давления в поровом пространстве керамического кирпича может возникать давление гидратации. Данный процесс также связан с увеличением объема твердой фазы и характерен для некоторых видов солей, способных отдавать или принимать молекулы воды в определенных температурных диапазонах [83].

Стоит отметить, что значительное влияние на процессы кристаллизации в теле кирпича будет оказывать строение порового пространства материала, а именно размеры радиусов пор. Многие ученые отмечают, что серьезный урон конструкции наносится тогда, когда соли кристаллизуются в мелких порах [83, 99, 104, 106]. Во-первых, связано это с тем, что скорость испарения в данных порах выше, по сравнению с более крупными. Во-вторых, вследствие интенсивного испарения влаги, растворы, содержащиеся в мелких порах, имеют высокую степень

насыщения. Это значит, что при осаждении солей из раствора, объем твердой фазы будет увеличиваться, а поскольку он не может быть компенсирован, из-за малого радиуса пор, увеличивается кристаллизационное давление, разрушающее материал изнутри. Однако, описанные выше явления, не исключают того факта, что кристаллизация солей происходит и в крупных порах. При этом может наблюдаться уменьшение объема пор материала, что препятствует миграции солевого раствора и вызывает заполнение последних, в результате чего происходит деструкция керамического кирпича.

Описанные явления, связанные с воздействием на кирпичную кладку влаги и водорастворимых солей, в соответствии с исследованиями [49] являются солевой формой физической коррозии. Развитие солевой коррозии является серьезной причиной, приводящей как к разрушению отдельных элементов кирпичной кладки, так и к снижению прочностных характеристик и несущей способности зданий и сооружений в целом [76].

1.2 . Виды солей и источники их поступления в кладку

Источники происхождения водорастворимых солей в кирпичных кладках могут быть различные, начиная от применяемого сырья и процессов производства кирпичных изделий, заканчивая условиями, в которых эксплуатируются здания и сооружения.

Считается, что наиболее распространенными видами солей, присутствующими в кладках, являются хлориды, сульфаты, нитраты и карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов [4, 83]. Так поступление в кладку хлоридов зачастую связано с применением противогололедных реагентов, воздействием на материал загрязненных грунтовых вод или морской воды, а в некоторых случаях с нарушением технологии очистки кирпича растворами, содержащими соляную кислоту [102]. Присутствие нитратов характерно для сооружений, эксплуатируемых в качестве мест содержания животных. Источниками карбонатов, как правило, являются цементные и известковые

растворы, а сульфаты могут находиться в самом керамическом материале [99, 102, 103, 104, 116].

Вместе с тем, к основным источникам растворимых солей в кирпичной кладке в настоящее время зачастую относят противоморозные и технологические добавки, вводимые в кладочный раствор [5, 6, 12, 51, 70]. Однако, обширные исследования [28, 31] кирпичных зданий и сооружений различного назначения, проведенные В.В. Инчиком, указывают на то, что источниками водорастворимых солей в большинстве случаев является непосредственно керамический кирпич.

Глинистое сырье, применяемое для изготовления кирпичных изделий, содержит в своём составе растворимые соли [52]. Разложение солей либо их переход в нерастворимые формы осуществляется в процессе обжига керамического кирпича. Однако, условия термической обработки, применяемые на кирпичных заводах, позволяют снизить количество водорастворимых солей не более чем на 40-50% [28].

Одновременно с этим топочные газы могут приводить к увеличению количества солей в керамическом материале. В процессе сушки и обжига изделий в результате воздействия сернистого газа SO_2 , выделяемого при сгорании топлива, и других факторов, оксиды и карбонаты Ca и Mg, содержащиеся в глине, переходят в сульфаты. Кроме того, согласно данным, приведенным в [102] кирпичи, обожженные ненадлежащим образом, содержат водорастворимые соединения сульфата натрия.

В кладочных растворах, в свою очередь, также присутствует достаточно большое количество растворимых солей [98]. Основным их источником является портландцемент, который вносит в раствор значительное количество серного ангидрида SO_3 и оксиды щелочных металлов Na_2O и K_2O [28]. При гидратации портландцемента щелочные металлы образуют гидрокарбонаты, которые при взаимодействии с углекислым газом переходят в растворимые карбонаты [28, 37]. Кроме того, при постоянном воздействии влаги из кладочного раствора будет вымываться гидроксид кальция, вследствие коррозии цементного камня (коррозия 1-го вида по Москвину) [50]. Последующая карбонизация за счет углекислого газа

приводит к образованию CaCO_3 , который может быть обнаружен в составе высолов на швах кирпичной кладки.

Утверждение о том, что основными источниками водорастворимых солей являются керамический кирпич и кладочный раствор подтверждается рентгенофазовым анализом минеральных составов образцов высолов, отобранных с поверхностей кирпичных стен и штукатурной отделки на объектах в Санкт-Петербурге.

В результате исследований установлено, что вещественный состав высолов, отобранных с поверхности штукатурной отделки кирпичных стен в большей степени представлен водорастворимым сульфатом магния в виде гексагидрита и эпсомита (рисунок 1.1). Минеральный состав высолов, отобранных с поверхности кирпичной кладки, в значительной мере содержит водорастворимый сульфат натрия в виде тенардита, сингенита, афтиталита (рисунок 1.2). Также, в некоторых пробах (рисунок 1.3) отмечено содержание трона – сесквикарбоната натрия (египетская соль) и галита (каменная соль), который являясь водорастворимым минералом способен образовывать высолы на поверхности кирпичной кладки при ее чрезмерном увлажнении.

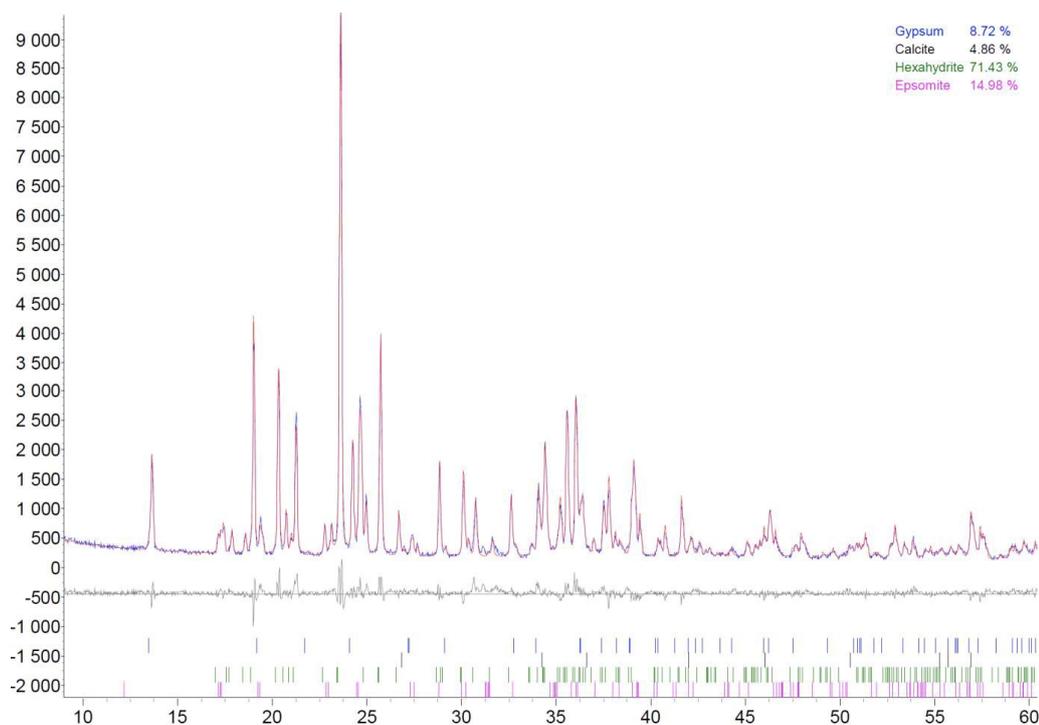


Рисунок 1.1 – Рентгенограмма пробы высолов, отобранных с поверхности штукатурной отделки кирпичных стен

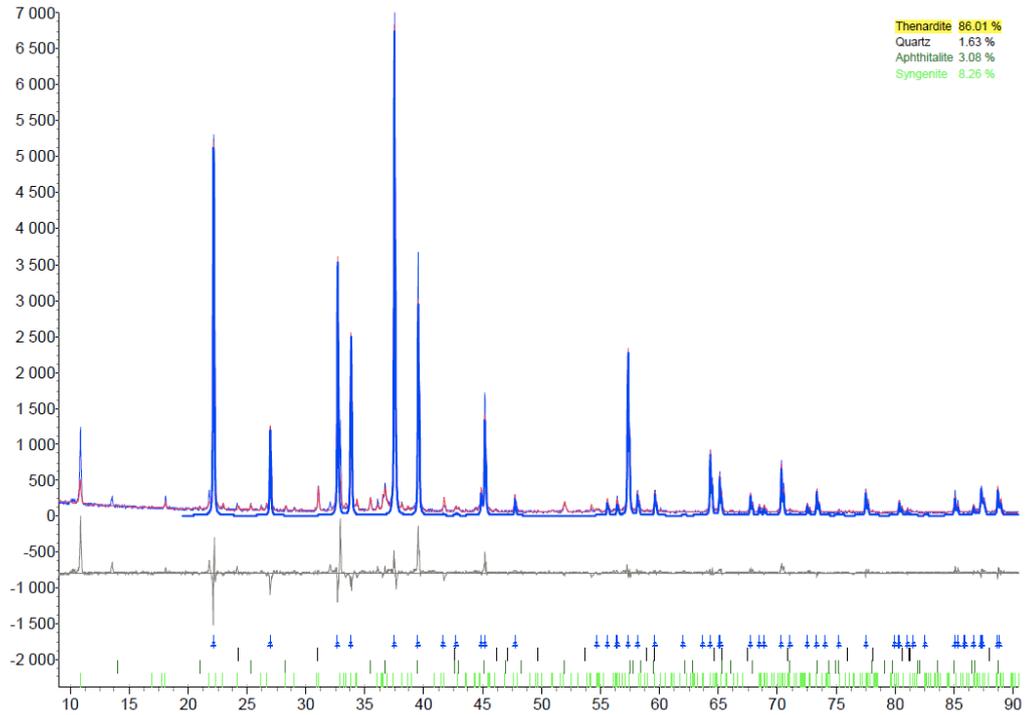


Рисунок 1.2 – Рентгенограмма пробы высолов, отобранных с поверхности кирпичной кладки (образец №1)

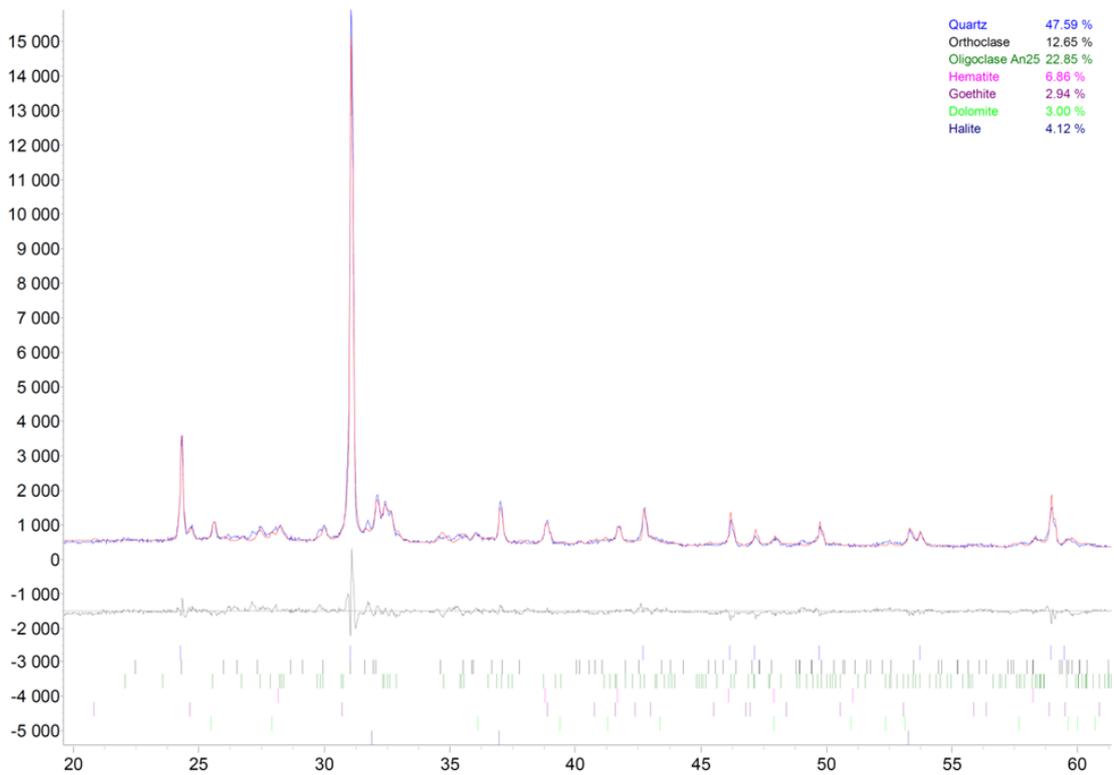


Рисунок 1.3 – Рентгенограмма пробы высолов, отобранных с поверхности кирпичной кладки (образец №2)

Таким образом, становится очевидным, что в качестве основных источников водорастворимых солей в первую очередь следует рассматривать изделия из керамики и кладочные растворы.

1.3. Санирующая штукатурка как элемент защиты от солевой коррозии

Избыточная влага является катализатором коррозионных процессов, приводящих к повреждению каменных конструкций. В связи с чем на начальном этапе комплекс мер по санированию направлен на проведение гидроизоляционных работ, целью которых является ликвидация источника увлажнения или существенное снижение поступления капиллярной влаги в кирпичную кладку. При этом после проведения указанных мероприятий в кладке сохраняется «остаточная» влага, с растворенными в ней ионами солей, что не устраняет предпосылок для дальнейшего развития солевой коррозии.

В настоящее время известно несколько способов, направленных на уменьшение количества «остаточной» влаги и снижение солевой нагрузки в каменных конструкциях. Так насыщенная солевыми растворами кирпичная кладка может высушиваться за счет воздействия потоков теплого воздуха. Однако это не позволяет комплексно решить проблему. Снижение «остаточной» влажности путем высушивания сопровождается образованием высолов, что требует дополнительных мер по их устранению, а также значительных энергетических и временных затрат вследствие того, что кладки зачастую представляют собой массивные толстостенные конструкции. По этой же причине нецелесообразно для обессоливания кладок применять бумажные компрессы, которые представляют собой смоченную в дистиллированной воде фильтровальную бумагу [7, 96].

Поскольку кирпичная кладка может высыхать естественным путем альтернативным способом предотвращения коррозионных процессов является применение так называемых «блокираторов солей». Зачастую это растворы соединений бария, которые при нанесении на поверхность кирпичной кладки переводят растворимые соли в труднорастворимую форму. Эффективность данного метода ограничена поверхностным действием, что делает

нецелесообразным его применение в тех случаях, когда растворы солей пронизывают весь объем кладки, поскольку их постоянная миграция к поверхности испарения будет сопровождаться появлением все новых и новых солевых отложений.

Обработка поверхности кирпичной кладки гидрофобизаторами в случае, когда конструкция насыщена влагой и водорастворимыми солями также имеет низкую эффективность и может привести к серьезным последствиям. Гидрофобизатор замедляет процессы высушивания конструкции, в результате солевой раствор в меньшем количестве выходит на лицевую поверхность, что визуально может выражаться в отсутствии высолов. Однако, глобально проблема сохраняется, поскольку влага, содержащаяся в конструкции, запирается в ней. В дальнейшем это может стать причиной более серьезных повреждений, начиная от снижения теплопроводности и деструктивных процессов морозного разрушения, заканчивая различными видами биоповреждений.

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных методов снижения водно-солевых нагрузок на каменные конструкции является устройство saniрующих покрытий [9, 18, 71, 85, 86, 87]. Под термином «санация» понимается процесс защиты увлажненных засоленных конструкций от солевой коррозии, в основе которого лежит механизм поглощения и нейтрализации солевых растворов. Преимущество данного метода заключается в его комплексном действии, что позволяет сократить количество остаточной влаги в кирпичной кладке и предотвратить ее повреждение, вследствие развития коррозионных процессов.

Использование в качестве saniрующих покрытий штукатурных составов имеет немаловажное достоинство, заключающееся в том, что они выполняют роль отделочных покрытий, которые воспринимают на себя солевую нагрузку, но при этом сохраняют удовлетворительный внешний вид отделки без видимых признаков разрушения или появления высолов достаточно длительное время. В случае, когда гидроизоляционные преграды полностью не предотвращают проникновение капиллярной влаги в конструкцию, такие штукатурки могут выполнять роль «жертвенных» покрытий, которые удаляются после наступления предельного

насыщения солями. Таким образом, saniрующие штукатурные смеси позволяют значительно продлить межремонтный срок эксплуатации зданий и сооружений.

Производство saniрующих штукатурок целесообразно осуществлять по технологии сухих строительных смесей заводского изготовления, так как в этом случае технически возможно обеспечить требуемую однородность состава и свойств многокомпонентных смесей, характеризующихся высокими показателями пористости и паропроницаемости [120]. Указанные технические характеристики смесей оказывают влияние на процессы водопоглощения и водоотдачи, что определяет механизм действия saniрующего материала. Соли в растворенном виде проникают из кирпичного основания в штукатурный слой, который благодаря высокопористой структуре обладает достаточным объемом пор, чтобы нивелировать негативное влияние физических и химических процессов кристаллизации солей. Таким образом, зона испарения «остаточной» влаги перемещается из капилляров кирпичной кладки в saniрующую штукатурку, при этом солевая нагрузка воспринимается поровым объемом последней, не вызывая ее механического разрушения [62, 63, 83].

Впервые saniрующие штукатурки появились и стали применяться на опытных объектах в Европе во второй половине XX века. При этом в отличие от большинства строительных материалов первичные разработки и практическое внедрение данных штукатурных смесей не базировались на многолетних научных исследованиях.

В 1980 году к обсуждению были представлены первые сведения о строительно-физических и технических требованиях к saniрующим штукатуркам. Впоследствии это привело к появлению в 1985 году бюллетени, содержащей минимальные требования к материалу, общее описание и область его применения. Однако выяснилось, что указанные требования являются не достаточными, поскольку штукатурные покрытия, соответствовавшие им, отличались низкой эффективностью на кирпичных основаниях с высокой степенью засоленности. Дальнейшие разработки привели к тому, что в 1991 году появилась WTA-инструкция 2-2-91 «Saniрующие штукатурные системы», созданная научно-

техническим рабочим обществом по сохранению строительных сооружений и памятников архитектуры. Данная WTA-инструкция на протяжении длительного времени оставалась единственным сводом требований к санирующим штукатуркам, но вместе с тем не имела статуса общепризнанного нормативно-технического документа.

Ситуация изменилась в 2003 году, когда в Европе вступил в действие стандарт DIN EN 998-1, в котором санирующие смеси рассматриваются как отдельный вид штукатурных растворов для влажных и засоленных кирпичных кладок. Впоследствии введение данного норматива и расширение представлений о свойствах санирующих штукатурок привело к появлению обновленной версии WTA-инструкции 2-9-04. В соответствии с новой версией для санирующих смесей в совокупности установлено до 14 технических параметров [121] которые представлены в таблице 1.1. При этом стоит отметить, что сведения о санирующих штукатурках, требования и методы испытаний, изложенные в WTA-инструкции, являются более обширными, чем те, которые содержатся в DIN EN 998-1.

Таблица 1.1 Свойства санирующей штукатурки согласно требованиям WTA

Параметр	Предъявляемые требования
Растворная смесь	
Консистенция, см	$17 \pm 0,5$
Теоретическая плотность, кг/дм ³	-
Пористость, объемн. %	> 25
Водоудерживающая способность, %	> 85
Удобообрабатываемость, см	< 3
Санирующая штукатурка	
Объемный вес отвержденного раствора ρ , кг/дм ³	< 1,4
Коэффициент сопротивления диффузии водяных паров μ	< 12
Прочность на растяжение при изгибе $R_{изг.}$, Н/мм ²	-
Прочность на сжатие $R_{сж.}$, Н/мм ²	1,5-5
Соотношение прочностей $R_{сж.}/R_{изг.}$	< 3
Капиллярное водопоглощение W_{24} , кг/м ²	> 0,3
Глубина проникновения воды h , мм	< 5
Пористость, объемн. %	> 40
Солестойкость	Должна подтверждаться документально

Несмотря на то, что опыт применения санирующих штукатурных смесей в Европе насчитывает порядка 50 лет, в России данный материал появился

относительно недавно. Широкое применение сухих строительных смесей в нашей стране началось с 90-х годов XX столетия и в последние десятилетия характеризуется значительными темпами роста [24, 39].

На сегодняшний день saniрующие штукатурки с нарастающей активностью используются при проведении комплекса работ по реставрации и реконструкции кирпичных кладок. Однако их широкое практическое применение в нашей стране сопряжено с отсутствием требований к данным штукатурным растворам, закрепленным в нормативно-технической документации. На рынке строительных материалов представлено достаточно большое разнообразие saniрующих составов от отечественных и зарубежных производителей. Сравнение технических характеристик, указанных производителями, для смесей с идентичной областью применения позволяет выявить существенные различия показателей [27], характеризующих качество и эффективность эксплуатационных свойств, о чем свидетельствуют данные, приведенные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Технические характеристики saniрующих смесей различных производителей

Технические характеристики	Производитель				
	Рунит Санирующая штукатурка (Россия)	Рунит Санирующая плюс (Россия)	Resmix SP (Россия)	Remmers SP Top (basic) (Германия)	SCHOMBURG Thermopal-SR24 (Германия)
Толщина слоя, мм	20	20	10-20	<u>1 слой</u> 15-30 <u>2 слоя</u> до 60	Min - 25 Max 40
Марка по удобоукладываемости	Пк3	Пк3	-	-	-
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа	Не менее 7,5	Не менее 5,0	4	CS II (1,5-5,0)	-
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Не менее 0,08	Не менее 0,09	0,1	-	-
Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара	-	-	-	≤ 15	≤ 15
Капиллярное водопоглощение раствора	-	-	< 0,3 кг/м ²	≥ 3 кг/м ²	≤ 2 кг/(м ² ·мин ^{0,5})

Глубина проникновения воды после испытания на водопоглощение при капиллярном подсосе, мм	-	-	< 5 мм	< 5 мм	-
--	---	---	--------	--------	---

Фактические испытания затвердевших растворов, изготовленных на основе saniрующих смесей, сведения о которых приведены в таблице 1.2, также свидетельствуют о том, что их свойства декларируются производителями в очень широких диапазонах без достаточного обоснования, что затрудняет выбор наиболее эффективного материала для конкретных условий применения. Результаты фактических испытаний saniрующих штукатурных смесей представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Результаты испытаний сухих штукатурных смесей для санации

№ п/п	Наименование сухой штукатурной смеси	Средняя плотность затвердевшего раствора, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Капиллярное водопоглощение, кг/(м ² ·ч ^{0,5})	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	Солестойкость, баллы
1	Рунит Санирующая штукатурка (Россия)	1820	2,5	8,1	0,75	0,079	5
2	Рунит Санирующая плюс (Россия)	1832	4,6	18,0	0,28	0,103	8
3	Resmix SP (Россия)	1054	0,5	0,96	0,09	0,344	5
4	Remmers SP Top (basic) (Германия)	1159	1,8	4,8	0,16	0,139	9
5	SCHOMBURG Thermopal-SR24 (Германия)	1072	1,5	3,6	0,15	0,137	4

В настоящее время в нашей стране нормативным документом, содержащим в себе физические и технические требования к saniрующим штукатурным растворам, является ГОСТ Р 57336-2016, действие которого было приостановлено на период с 14.01.2020 до 01.01.2022 [2]. Данный документ является переводом европейского стандарта DIN EN 998-1:2010 и предписывает определять и контролировать все свойства saniрующего штукатурного раствора со ссылками на европейские методы испытаний. Вместе с тем рекомендуется вместо ссылочных европейских стандартов применять соответствующие им национальные стандарты

РФ, а в случае их отсутствия допускается использовать переводы на русский язык европейских норм.

Согласно Приложению ДА, приведенному в ГОСТ Р 57336-2016 в нашей стране действует только один нормативный документ для штукатурных растворов, методы испытаний в котором идентичны европейскому стандарту, это ГОСТ Р 57338-2016, применяемый для оценки пределов прочности при сжатии и изгибе. Для определения остальных технических характеристик отсутствуют соответствующие европейским национальные стандарты. В качестве исключения, стоит отметить перевод европейского норматива EN 1015-18-2003, содержащего методы определения глубины проникновения воды и капиллярного водопоглощения затвердевшего раствора. Однако обоснование использования вышеупомянутого перевода зарубежного стандарта без адаптации методов испытаний имеет очевидные препятствия для его практического применения.

Санитирующие штукатурные смеси относятся к категории продукции, качество которой в обязательном порядке подтверждается методом декларирования. При этом ГОСТ Р 57336-2016 не входит в перечень нормативных документов, устанавливающих обязательные требования к продукции для подтверждения ее соответствия [1]. Для этих целей применяется ГОСТ 33083-2014, в котором указаны технические характеристики для штукатурных смесей на основе цементного вяжущего. Однако, в данном стандарте санитарные смеси не рассматриваются как отдельный вид штукатурных растворов, что вызывает затруднения в оценке соответствия, поскольку не определен нормированный диапазон технических характеристик. Кроме того, в соответствии с [1] показатель капиллярного водопоглощения не входит в перечень подтверждаемых требований, хотя является важным параметром с точки зрения механизма действия данного материала. Использование же в качестве нормативных тех требований, которые изложены в ГОСТ Р 57336 осложняется тем, что европейские стандарты, составляющие основу вышеупомянутого документа, предусматривают применение, во-первых, различных методов испытаний, во-вторых, нацелены на установление не идентичных параметров.

Отсутствие обязательных требований к saniрующим штукатуркам является следствием недостаточной изученности вопросов, касающихся ключевых параметров, отражающих эффективность защитных свойств данного материала применительно к солевой коррозии. Во многих работах [10, 63, 72, 73, 74, 77, 78, 90] в качестве основного критерия эффективности принято рассматривать пористость затвердевшего раствора. Однако, в соответствии с механизмом действия saniрующей штукатурки, становится очевидным, что эффективность защитных свойств данного материала определяется в большей степени его способностью к массопереносу водных растворов солей из структуры керамического кирпича в структуру штукатурного слоя. При этом процесс массопереноса обусловлен наличием системы порового пространства с оптимальными показателями перколяции, которая способна сдерживать выход солей на лицевую поверхность кладки.

Согласно данным, приведенным в [83], формирование пористой структуры saniрующей штукатурки происходит за счет применения специальных добавок, способствующих образованию воздушных пор, а также пор с гидрофобизованной поверхностью. Это позволяет увеличить поровый объем saniрующей штукатурки и добиться ограничения скорости капиллярного водопоглощения за счет гидрофобизации материала. При этом автор утверждает, что обеспечивается капиллярный транспорт водных растворов солей из кирпичной кладки в штукатурный слой, но с «учетом определенной геометрии пор и их гидрофобизованных стенок будет происходить только в пределах первых пяти миллиметров saniрующего слоя». Дальнейшее движение влаги, вследствие нарушения однородности капиллярной структуры воздушными порами, будет осуществляться посредством диффузии в виде водяного пара. Однако представленные выводы имеют некоторые противоречия. В среднем толщина слоя saniрующей штукатурки составляет порядка 20 мм [120]. В связи с чем становится очевидным, что объема порового пространства в пределах 5 мм будет недостаточно для обеспечения миграции солевых растворов и одновременной кристаллизации солей. Таким образом в довольно короткие сроки saniрующая штукатурка может

насытится солями в пределах контактной зоны, что приведет к снижению адгезионной прочности и механическому разрушению saniрующего слоя, особенно при высокой степени засоленности кладки. Кроме того, наличие гидрофобизатора в составе saniрующей штукатурки может вовсе препятствовать миграции солевых растворов в структуру материала, что в свою очередь спровоцирует вынос и отложение солей в контактной зоне [115]. Также стоит отметить, что автором не указаны диапазоны эффективного действия гидрофобизирующих добавок в составе saniрующих штукатурок, что вызывает сомнения в целесообразности их применения. Так в [19] приводятся данные, согласно которым введение гидрофобизатора в количестве 0,2% от массы сухой смеси приводит к практически полному отсутствию капиллярного водопоглощения, что в целом делает невозможным миграцию водных растворов солей в структуру saniрующей штукатурки.

В [41, 63] авторы также утверждают, что благодаря крупнопористой структуре и гидрофобизации saniрующей штукатурки ее всасывающая способность снижается таким образом, что капиллярное водопоглощение практически отсутствует. Одновременно с этим отмечается, что миграция влаги через saniрующее покрытие происходит в форме водяного пара. Однако данное утверждение не является бесспорным, поскольку в соответствии с механизмом действия saniрующей штукатурки важно, чтобы солевой раствор поступал в штукатурное покрытие в жидком агрегатном состоянии. Это обеспечивает перемещение зоны испарения из кирпичной кладки в штукатурный слой, тем самым снижается солевая нагрузка на конструкцию. Если же влага будет поступать в штукатурку в виде водяного пара, то соли, оставаясь в кладке, продолжат свое разрушительное действие.

В тоже время достаточно неточным представляется утверждение, приведенное в [62], согласно которому «гидрофобность saniрующей штукатурки препятствует гигроскопическому поглощению влаги из засоленной кладки и воздуха». Если гидрофобность материала предупреждает проникновение водяных паров из кирпичной кладки, то очевидно предположить, что и водные растворы

солей также не будут поступать в структуру saniрующей штукатурки, что приведет как отмечалось ранее к кристаллизации солей в контактной зоне.

Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что противоречивость приведенных утверждений свидетельствует об отсутствии научно обоснованных теоретических принципов подбора составов saniрующих штукатурок, учитывающих необходимость создания условий для массопереноса водных растворов солей из кирпичной кладки в штукатурный слой.

Недостаток единых требований к saniрующим штукатурным смесям помимо вышеперечисленного обуславливает наличие разных подходов к способам устройства штукатурных покрытий. Одни производители предполагают использование многослойных saniрующих систем, другие однослойное нанесение. При этом на сегодняшний день преимущество сохраняется за многослойными покрытиями [90].

В соответствии с WTA-инструкцией система saniрующих штукатурок состоит из следующих слоев: обрызг (мостик сцепления), грунтовочная или выравнивающая штукатурка и непосредственно saniрующая штукатурка.

Обрызг наносится для обеспечения адгезионной связи между последующим штукатурным слоем и кирпичным основанием. Данный слой должен обладать достаточной солейстойкостью, иметь толщину не более 5 мм и площадь покрытия меньше 50% [120].

Грунтовочный слой служит для выравнивания поверхности, а в случае повышенной засоленности кладки выступает в качестве соленакпливающего слоя. Для данного покрытия характерна высокая пористость и низкая гидрофобность, что обеспечивает миграцию водных растворов солей и их накопление в грунтовочном слое. Минимальные требования к грунтовочной (выравнивающей) штукатурке приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 Свойства грунтовочной (выравнивающей) штукатурки согласно требованиям WTA

Параметр	Предъявляемые требования
Растворная смесь	
Консистенция, см	17 ± 0,5

Пористость, объемн. %	> 20
Грунтовочная (выравнивающая) штукатурка	
Коэффициент сопротивления диффузии водяных паров μ	< 18
Прочность на сжатие $R_{сж.}$, Н/мм ²	Выше, чем для слоя санирующей штукатурки
Капиллярное водопоглощение W_{24} , кг/м ²	> 1,0
Глубина проникновения воды h , мм	> 5
Пористость, объемн. %	> 45 ¹⁾
¹⁾ только пористая грунтовочная штукатурка	

После устройства обрызга и грунтовочного (выравнивающего) слоя производится нанесение санирующей штукатурки, как минимум в один слой, с минимальной толщиной покрытия 20 мм.

Многослойные санирующие системы безусловно имеют практическую эффективность несмотря на то, что отсутствует научно обоснованная необходимость их применения. Однако, как показывает практика, в нашей стране данному подходу присуща низкая надежность, поскольку устройство таких систем требует определенных навыков выполнения работ. Зачастую допускаются очень большое количество ошибок вследствие низкой квалификации исполнителей. В результате наносимые покрытия не выполняют свою защитную функцию, пропускают через себя водные растворы солей, что приводит к образованию высолов. Кроме того, возможны случаи, когда в достаточно короткие сроки происходит разрушение или отслоение штукатурных систем вследствие нарастающего кристаллизационного давления, поскольку в системе порового пространства материала не сформировано необходимое количество пор.

Также стоит отметить, что устройство санирующих штукатурных систем требует длительного периода производства работ [83, 90], что в условиях современных требований к темпам строительства препятствует широкому использованию данной технологии. Поэтому упрощение таких систем до однослойных санирующих покрытий на сегодняшний день является наиболее приоритетным.

Выводы по первой главе

1) Предупреждение поступления капиллярной влаги в кирпичную кладку не устраняет предпосылок для развития солевой коррозии, поскольку в кладке сохраняется «остаточная» влага, что требует разработки дополнительных мер, направленных на снижение водно-солевой нагрузки. Наиболее эффективным способом защиты каменных конструкций от разрушающего воздействия влаги и водорастворимых солей является использование saniрующих штукатурных смесей;

2) Широкое практическое применение saniрующих штукатурок сопряжено с отсутствием требований как для нормирования свойств данного материала, так и для подтверждения соответствия качества методом декларирования;

3) Описанные в литературе свойства saniрующих штукатурок и механизмы массопереноса водных растворов солей имеют противоречия, что не позволяет однозначно установить ключевые параметры, отражающие эффективность защитных свойств материала применительно к солевой коррозии;

4) Отсутствуют научно обоснованные и общепринятые подходы к производству и практическому применению однослойных saniрующих штукатурок, что затрудняет выбор наиболее эффективного материала для конкретных условий применения.

5) На основе изложенного выше определены цель и задачи диссертационного исследования.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Сырьевые материалы применяемые в экспериментальном исследовании

2.1.1. Портландцемент

В качестве основного вяжущего вещества применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020. Характеристики вяжущего представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Характеристики портландцемента

Показатель	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н
Нормальная густота цементного теста, %	28,0
Сроки схватывания цементного теста, мин	Начало схватывания – 142
	Конец схватывания – 211
Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 2 суток)	23,7
Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 28 суток)	54,4

2.1.2. Гидратная известь

В качестве дополнительного вяжущего вещества применялась гидратная известь 1 сорта. Характеристики материала соответствуют требованиям действующего стандарта ГОСТ 9179-2018 и представлены в таблице 2.2. Значение насыпной плотности определялось в качестве дополнительного параметра.

Таблица 2.2 Характеристики используемой гидратной извести

Показатель	Гидратная известь 1 сорта
Содержание активных СаО + MgO, %	70
Содержание СО ₂ , %	2,5
Проход через сито, %	№ 02 – 100
	№009– 98
Влажность, %	1
Насыпная плотность, кг/м ³	358

2.1.3. Песок строительный

В качестве заполнителя применялся песок строительный с наибольшей крупностью зерен 2,5 мм, модулем крупности $M_{кр.} = 2,12$ и насыпной плотностью

1527 кг/м³. Характеристики материала соответствуют требованиям ГОСТ 8736-2014. Гранулометрический состав материала представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Гранулометрический состав кварцевого песка

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах						Модуль крупности $M_{кр.}$
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16	
Частный	4,19	6,98	24,17	37,74	18,08	8,84	2,12
Полный	4,19	11,17	35,34	73,08	91,16	100	

2.1.4. Микрокальцит

Для придания смеси технологичности, определяющей удобство ее нанесения на вертикальные поверхности ручным способом, в качестве наполнителя применялся микрокальцит марки КМ-100 (ГОСТ 56775-2015). Основные свойства материала представлены в таблице 2.4

Таблица 2.4 Характеристики используемого микрокальцита КМ-100

Показатель	Микрокальцит марки КМ-100
Массовая доля углекислого кальция, % не менее	98
Остаток после просева, % на сите с сеткой номер 0,100	2,0
Влажность, %	0,98

2.1.5. Пористые заполнители

Для направленного формирования структуры и защитных свойств saniрующих смесей применялись пористые заполнители: перлитовый песок марки М75 в соответствии с требованиями ГОСТ 10832-2009 и гранулированное пеностекло фракции 0,1 – 2 мм согласно ТУ 23.19.12-001-91978852-2018. Основные свойства пористых заполнителей представлены в таблицах 2.5 – 2.8. С помощью сканирующего электронного микроскопа получены изображения структур пористых заполнителей, представленные на рисунках 2.1 и 2.2.

Таблица 2.5 Характеристики используемого перлитового песка

Показатель	Перлитовый песок марки М75
Насыпная плотность, кг/м ³	75
Удельная поверхность, м ² /г	1,1
Теплопроводность при температуре (25±5)°С, Вт/(м·°С), не более	0,043
Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа	Не нормируется
Влажность, % по массе	Не более 2

Таблица 2.6 Гранулометрический состав перлитового песка

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частный	0,0	4,0	46,0	25,4	13,5	11,1
Полный	0,0	4,0	50,0	75,4	88,9	100,0

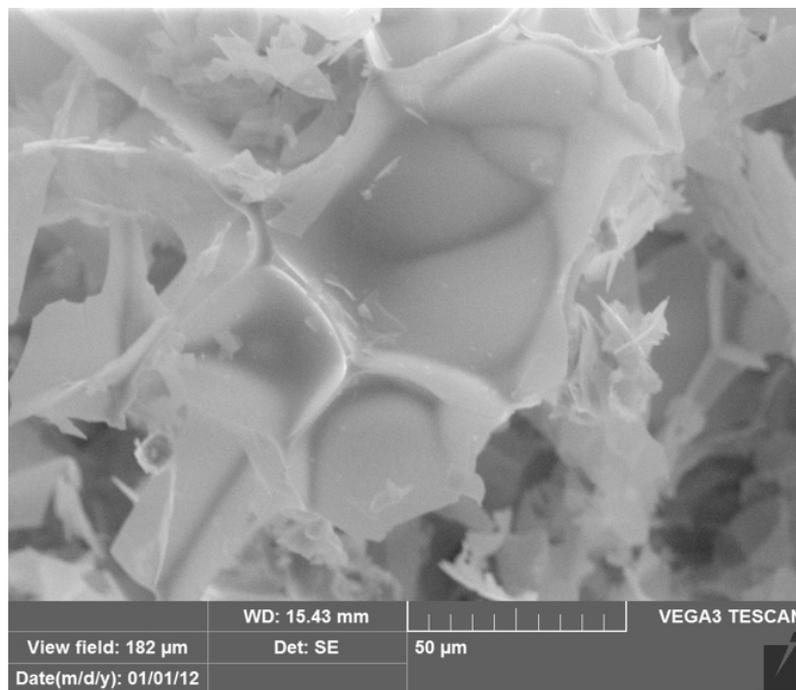


Рисунок 2.1 – Структура вспученного перлитового песка

Таблица 2.7 Характеристики используемого гранулированного пеностекла

Показатель	Гранулированное пеностекло
Средняя плотность, кг/м ³	250
Насыпная плотность, кг/м ³	215
Удельная поверхность, м ² /г	0,6
Предел прочности при сжатии, МПа	6
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,075
Водопоглощение, %	по массе 57,1
	по объему 10,6

Таблица 2.8 Гранулометрический состав гранулированного пеностекла

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частный	19,0	28,6	36,9	8,3	7,2	-
Полный	19,0	47,6	84,5	92,8	100,0	-

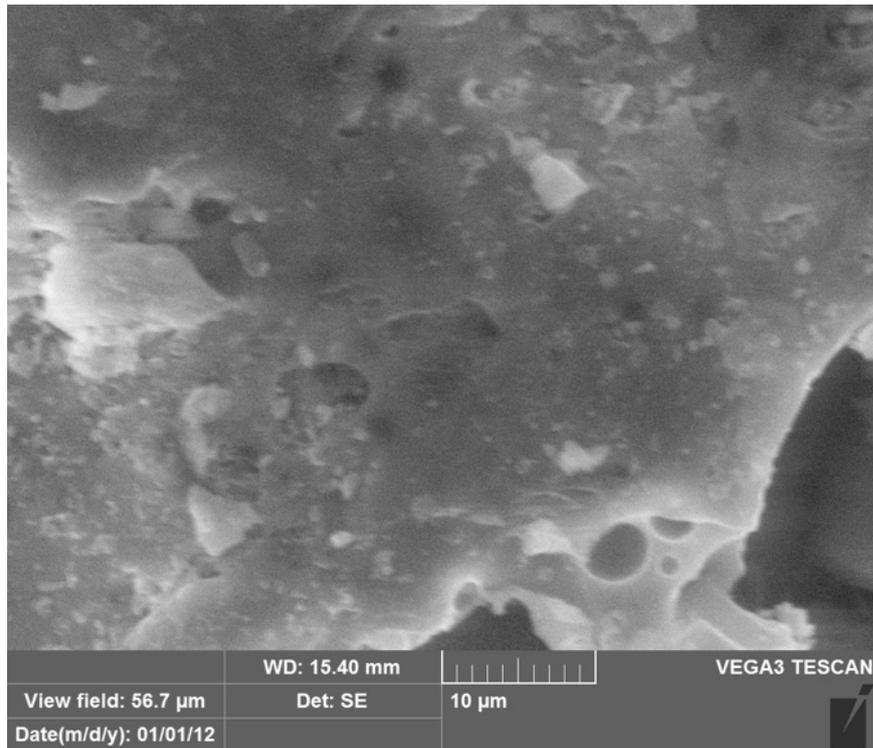


Рисунок 2.2 – Структура пеностекла

2.1.6. Керамический кирпич

Для проведения эмпирической оценки защитных свойств saniрующих смесей в качестве основания применялись глиняные полнотелые кирпичи марки М150, изготовленные методом пластического формования. Основные характеристики керамических изделий представлены в таблице 2.9. Изображение структуры керамического черепка, полученного с помощью электронного сканирующего микроскопа приведено на рисунке 2.3.

Таблица 2.9 Характеристики керамического кирпича

Показатель	Глиняный полнотелый кирпич марки М150
Средняя плотность, кг/м ³	1880
Водопоглощение, %	11,8

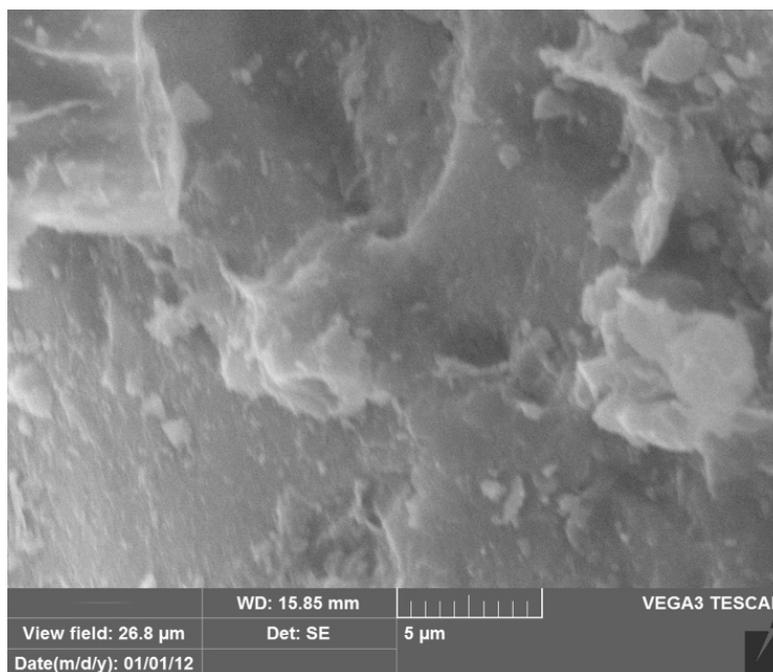


Рисунок 2.3 – Структура керамического кирпича

2.2. Оборудование, применяемое в исследовании

В рамках экспериментальной части диссертационного исследования использовалось следующее лабораторное оборудование:

1. Дозирование сырьевых материалов – электронные весы МК-32.2-А20 с верхним пределом нагружения 32 кг, весы ВЛТЭ-2100 с максимальной нагрузкой 1,2 кг и точностью взвешивания до 0,01 г;
2. Определение насыпной плотности – Воронка ЛОВ для определения насыпной плотности;
3. Перемешивание сыпучих компонентов – лабораторный смеситель СПБ – АМП – 3 типа «пьяная бочка» с объемом смесительной емкости 3 л;
4. Приготовление растворных смесей – Лабораторный растворосмеситель *Matest E095*;
5. Определение технологических характеристик растворной смеси – встряхивающий столик *Matest E087-05*, металлическая форма-конус;
6. Изготовление образцов – металлические формы размером 40x40x160 мм для изготовления образцов – балочек, металлические формы размером 70,7x70,7x70,7 мм для изготовления образцов – кубиков; металлические формы

размером 100x100x100 мм для изготовления образцов квадратного сечения со стороной 100 мм и толщиной 30 мм.

7. Хранение образцов - камера нормального твердения *Matest E138*;
8. Определение предела прочности при сжатии - Гидравлический пресс *Matest Cyber-Plus Evolution* с полезной нагрузкой 1500 кН;
9. Высушивание образцов до постоянной массы – шкаф сушильный LOIP LF-60/350 VS1.

2.3. Планирование эксперимента и технология изготовления образцов

2.3.1. Метод планирования эксперимента

Для получения материалов с заданными свойствами, а также управления их качеством в процессе производства, рекомендуется использование математических количественных методов, позволяющих целенаправленно воздействовать на отдельные факторы, оценивать различные варианты и сравнивать их между собой. Подходов к решению указанной задачи существует множество. Но так как для большинства строительных материалов характерно наличие некоторой дисперсии значений параметров, определяющих их свойства, широкое распространение получили статистические подходы к созданию математических моделей [85].

Классическим методом исследования свойств строительных материалов является метод полного факторного эксперимента – ПФЭ. Использование данного метода позволяет получить достоверную экспериментально-статистическую модель исследуемого объекта по минимально возможному количеству экспериментальных данных, которая будет отражать влияние переменных факторов (X_n) на рассматриваемые параметры материала (Y_n).

В рамках проводимых исследований экспериментальная составляющая реализовывалась на основе двухфакторного трехуровневого эксперимента. Количество опытов при проведении на трех уровнях $N = 3^2 = 9$. Условия проведения эксперимента в виде матрицы планирования представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 Матрица планирования ПФЭ

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	X_1^2	X_2^2
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	1	1
4	1	-1	-1	1	1	1
5	1	1	0	0	1	0
6	1	-1	0	0	1	0
7	1	0	1	0	0	1
8	1	0	-1	0	0	1
9	1	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0

Общий вид уравнения регрессии для двухфакторного трехуровневого эксперимента представлен формулой (2.1):

$$\overline{Y}_{\text{расч.}} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (2.1)$$

где: $\overline{Y}_{\text{расч.}}$ – исследуемый параметр, как функция средних значений; b_0 – свободный член; b_i – коэффициенты при линейных членах X_i ; b_{ij} – коэффициенты при произведении факторов $X_i \cdot X_j$; b_{ii} – коэффициенты при квадратичных членах X_i^2 .

Проверка воспроизводимости численных экспериментов (однородности дисперсий, полученных при проведении параллельных опытов) производилась по критерию Кохрена. Значимость коэффициентов уравнений регрессии определялась в соответствии с критерием Стьюдента. Оценка адекватности полученных уравнений регрессии экспериментальным данным проводилась с помощью критерия Фишера.

2.3.2. Технология изготовления образцов

Технология приготовления штукатурных saniрующих смесей состоит из нескольких этапов, выполнение которых производится в определенной последовательности. Первый из них сводится к получению однородной смеси сухих компонентов. Отдозированные материалы загружаются в лабораторный смеситель СПБ-АМП-3, где осуществляется их равномерное перемешивание до гомогенного состояния. Затем, полученная сухая смесь перемещается в чашу

лабораторного растворосмесителя *Matest E095*, где затворяется водой, количество которой составляет 16,5% от массы всех сухих компонентов, что соответствует водотвердому отношению, при котором достигается нормируемая подвижность. Последним, завершающим этапом является процесс перемешивания вышеназванных составляющих до получения штукатурного раствора заданной подвижности, которая определяется опытным путем.

Время перемешивания сухих компонентов с водой назначается в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58277-2018 и должно составлять не менее 3 минут:

- перемешивание в течение 120 с;
- остановка миксера для снятия налипшей на стенки ёмкости смеси в течение 90 с;
- перемешивание в течение 60 с.

Из приготовленной растворной смеси производится формование образцов-кубов размером 70,7x70,7x70,7 мм, образцов-балок размером 40x40x160 мм, а также образцов квадратного сечения со стороной 100 мм и толщиной 30 мм.

Хранение образцов до набора требуемой прочности осуществляется по следующей схеме:

- 2 суток образцы хранятся в формах при относительной влажности воздуха $(95 \pm 5) \%$;
- затем образцы подвергают распалубке и в течение 5 суток продолжают хранение при относительной влажности воздуха $(95 \pm 5) \%$;
- далее на протяжении 21 дня образцы хранятся при относительной влажности воздуха $(60 \pm 10) \%$.

2.4. Методы испытаний

В ходе выполнения диссертационного исследования использовались стандартные методы испытаний, закрепленные в нормативно-технической документации, а также нестандартные методики, применение которых обусловлено спецификой работы.

2.4.1. Определение технологических свойств растворной смеси и физико-механических свойств раствора

Определение подвижности по расплыву конуса, определение водоудерживающей способности растворной смеси, определение капиллярного водопоглощения и прочности сцепления с основанием (адгезии) затвердевшего раствора производилось в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний».

Определение средней плотности образцов затвердевшего раствора производилось в соответствии с ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

Определение предела прочности при сжатии затвердевшего раствора, производилось в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний» и ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Определение показателей пористости затвердевшего раствора по кинетике водопоглощения производилось в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости».

Определение паропроницаемости образцов производилось в соответствии с методикой ГОСТ 25898-2020 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию».

2.4.2. Определение капиллярного и поверхностного поглощений раствора

Чтобы оценить способность saniрующих штукатурных покрытий поглощать и транспортировать водные растворы солей рассмотрены такие показатели как поверхностное и капиллярное поглощение. Поверхностное поглощение определяет впитывающую способность поверхностного слоя защитного покрытия, прилегающего к кирпичной кладке, что влияет на процесс массопереноса солевых растворов. 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. Поскольку указанные показатели связаны с впитыванием и миграцией водных растворов солей в структуре saniрующего покрытия, требуется разработка методов для их количественной оценки.

В данной работе для определения капиллярного поглощения модифицирована методика, изложенная в ГОСТ Р 58277-2018. Особенность saniрующих штукатурок в период эксплуатации заключается в поглощении водных растворов солей, а не воды в чистом виде. В связи с этим необходимо установить влияние среды насыщения на изменение величины капиллярного поглощения. Для этой цели проведен сравнительный анализ трех различных составов (рисунок 2.4) 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. У контрольного состава (без содержания легких заполнителей) отмечено снижение интенсивности капиллярного поглощения на 60% при испытании образцов в солевом растворе. Для составов 2 и 3, в которых 5% объема кварцевого песка были замещены гранулированным пеностеклом и перлитовым песком, характерно повышение величины капиллярного поглощения по сравнению с контрольным составом на 22% (для состава 2 с пеностеклом) и на 157% (для состава 3 с перлитовым песком) при насыщении образцов в воде. При испытании этих же составов в водном растворе NaCl тенденция к повышению капиллярного поглощения относительно контрольного состава сохраняется за счет присутствия в объеме пористых заполнителей. Однако, по сравнению с результатами, полученными при насыщении образцов в воде значение капиллярного поглощения для состава 2 (содержание пеностекла 5%) снижается на 62%, а для состава 3 (содержание перлита 5%) на 74%. Подобное сокращение величины капиллярного поглощения обусловлено разной плотностью веществ, в которых производилось насыщение образцов: чем выше плотность жидкости, поглощаемой материалом, тем ниже капиллярная сорбция. Таким образом, для моделирования более точных условий

работы saniрующих растворов при оценке капиллярного поглощения представляется целесообразным использовать солевые растворы взамен воды.

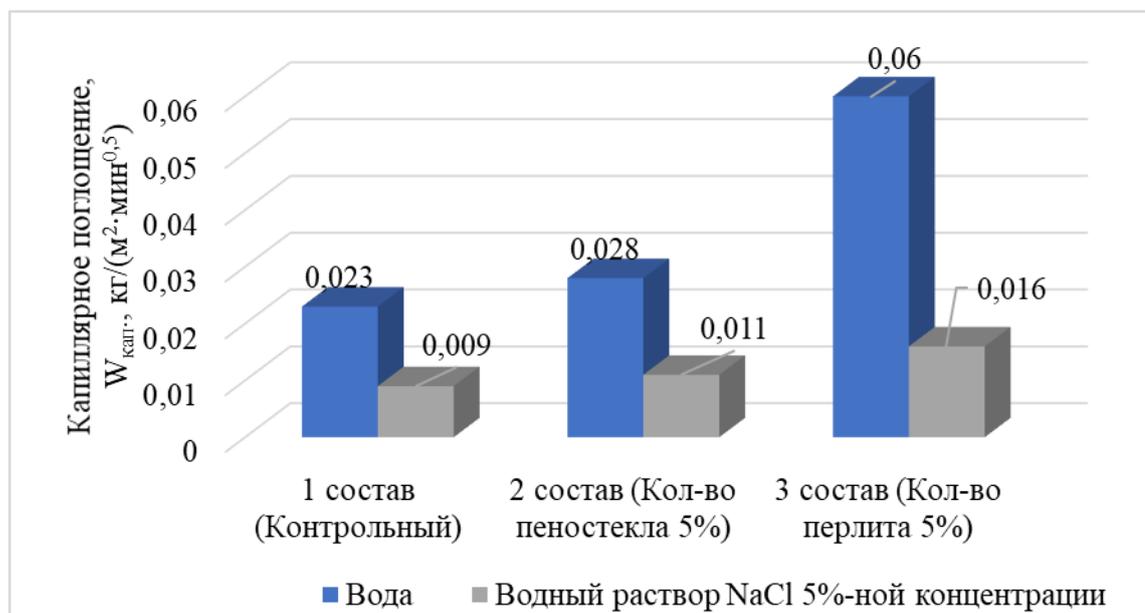


Рисунок 2.4 – Сравнительный анализ величин капиллярного поглощения при насыщении образцов водой и водным раствором NaCl

В качестве способа позволяющего оценить возможность saniрующих составов поглощать солевые растворы рассматривалась методика, основанная на применении специального прибора – трубки Карстена. Данный прибор в соответствии с европейскими стандартами (DIN 4117 и DIN 1048) рекомендован для определения степени водопоглощения бетонных конструкций [26].

Использование трубки Карстена с целью определения величины поверхностного поглощения позволяет смоделировать механизм перемещения водных растворов солей в saniрующий состав с наибольшим соответствием физическому принципу взаимодействия элементов.

Конструкция трубки представляет собой стеклянный горизонтальный колокол с внутренним диаметром 25,9 мм и встроенной градуированной трубкой объемом 10 мл (соответствует 10 см водяного столба). Цена деления соответствует объему 0,1 мл.

Определение поверхностного поглощения производится на образцах с линейными размерами 100x100x30 мм, поверхность которых предварительно

подготавливают, очищая металлической щеткой от загрязнений и пыли. Далее при помощи силиконового герметика трубка Карстена герметично крепится к испытуемому образцу, после чего 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 (2.2):

$$W_{\text{пов.}} = K \cdot V, \quad (2.2)$$

где: V – объем солевого раствора NaCl, поглощаемого в течение принятого времени испытания, м³; K – коэффициент поверхностного поглощения, вычисляемый по формуле (2.3):

$$K = 1/(S\sqrt{t}), \quad (2.3)$$

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

За результат испытания принимают среднеарифметическое значение результатов испытания трех образцов, округлённое до 0,01 м/мин^{0,5}.

2.4.3. Определение величины солестойкости затвердевшего раствора

В условиях высокой паропроницаемости saniрующей штукатурки, поглощенные из кирпичной кладки водные растворы солей будут иметь опережающий темп испарения капиллярной жидкости, что должно предотвратить ее выход налицевую поверхность отделки. С другой стороны, в saniрующем слое будет происходить процесс аккумуляции солей, что в последствие может стать причиной разрушения материала. В связи с этим возникает необходимость оценки стойкости saniрующих штукатурных смесей к агрессивному воздействию солей.

Анализ нормативно-технической документации на сухие строительные смеси и строительные растворы показал, что подобные методы испытаний отсутствуют. Однако существует методика, изложенная в ГОСТ 30629-2011, позволяющая оценить солестойкость горной породы. Указанная методика была адаптирована под цели и задачи диссертационного исследования. Внесены

изменения в части количества времени, необходимого для попеременного насыщения образцов в растворе сернокислого натрия, их высушивания и охлаждения. Для определения солестойкости saniрующих растворов количество вышеназванных циклов принято равным пяти.

Испытания проводят на образцах-кубах с линейными размерами 70,7x70,7x70,7 мм. Твердение образцов осуществляется в соответствии с режимом, указанным в пункте 2.3.2, после чего их высушивают до постоянной массы, очищают от загрязнения и пыли, взвешивают и фиксируют массу каждого образца.

Величина солестойкости saniрующего раствора оценивается по потере массы образцов Δm , % по формуле (2.4) с точностью до 0,01%:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100, \quad (2.4)$$

где: m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г.

Выводы по второй главе

1) Приведены основные характеристики сырьевых материалов, применяемых для изготовления сухих saniрующих смесей, представлен способ изготовления образцов, согласующийся с методами, используемыми в технологии сухих строительный смесей.

2) Обоснована необходимость применения водных растворов солей при оценке капиллярного поглощения, что позволяет проводить испытание в соответствии с реальными условиями эксплуатации материала.

3) Предложены методики количественной оценки капиллярного и поверхностного поглощений – показателей, связанных с впитыванием и миграцией водных растворов солей в структуре saniрующего штукатурного покрытия. Определены стандартные методики для оценки технологических свойств и физико-механических показателей растворов на основе исследуемых составов сухих saniрующих смесей.

4) Предложена методика определения солестойкости для оценки способности санирующих растворов аккумулировать в своем объеме водорастворимые минералы с сохранением эксплуатационных свойств.

3. ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЗАЩИТЫ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ САНИРУЮЩИМИ РАСТВОРАМИ

3.1. Факторы, определяющие капиллярный переход жидкой фазы из керамического кирпича в saniрующий раствор

Защитные свойства saniрующей штукатурки заключаются, главным образом, в ее способности к поглощению водных растворов солей из кирпичной кладки и их удержанию в собственном объеме. За счет этого исключается скопление солевых отложений на лицевой поверхности стен, между слоями отделочных материалов, а также в поровом пространстве поверхностного слоя кладки.

Очевидным является то, что целесообразность нанесения saniрующего покрытия обусловлена активной миграцией жидкости в объеме каменной конструкции от источника увлажнения к плоскости испарения и возможностью ее перехода при определенных условиях в смежные слои материалов благодаря развитой системе пор и капилляров в кладке. Следовательно, механизм защитного действия saniрующих штукатурок должен базироваться на закономерностях транспортировки солевых растворов из капиллярной системы каменной кладки в поровое пространство защитного покрытия.

Взаимодействие жидкости с капиллярно-пористым телом обусловлено возникновением капиллярных и поверхностных сил. Известно, что при частичном заполнении капилляров на межфазной границе раздела между жидкостью, газом и твердым телом действуют поверхностные силы натяжения, которые ведут к образованию мениска – некоторой искривленной поверхности жидкости [88]. Мениск, стремясь принять равновесную форму, вызывает появление капиллярного давления, которое согласно уравнению Лапласа равно (3.1):

$$P_{\text{к}} = P_{\text{ж}} - P_{\text{г}} = \pm \frac{2\sigma_{\text{ж,г}} \cos\theta}{\rho_{\text{к}}}, \quad (3.1)$$

где: $P_{ж}$ и $P_{г}$ – давление в жидкости и газе; $\sigma_{ж,г}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела жидкость-газ; θ – величина угла смачивания поверхности капилляра жидкостью; $\rho_{к}$ – радиус цилиндрического капилляра.

Капиллярное давление определяет поведение жидкости в капиллярах в зависимости от краевого угла смачивания, связанного с поверхностным натяжением на границах раздела фаз, и может иметь как положительные, так и отрицательные значения, что обусловлено формой мениска. Если его поверхность вогнута, что характерно для смачивающих жидкостей – капиллярное давление отрицательно и стремится в сторону газовой фазы. В результате происходит заполнение капилляров материала поглощаемым веществом. Несмачивающие жидкости имеют выпуклую поверхность мениска, как следствие капиллярное давление больше нуля и направлено в сторону жидкой фазы, что способствует ее вытеснению из капилляров.

Поскольку для водных растворов солей значение краевого угла $\varphi < 90^\circ$, они представляют собой смачивающие жидкости. Поэтому при попадании в капилляры пористых тел происходит их заполнение солевыми растворами. Данный процесс протекает до тех пор, пока капиллярное давление, согласно условиям термодинамического равновесия [38], не будет соответствовать гидростатическому давлению столба жидкости (3.2):

$$\gamma_{ж} g h_{к} = \frac{2\sigma_{ж,г} \cos\theta}{\rho_{к}} = -P_{к}, \quad (3.2)$$

где: $\gamma_{ж}$ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; $h_{к}$ – степень заполнения капилляра.

Исходя из выражения (3.2) можно определить степень заполнения капилляра, которая согласно формуле (3.3) равна:

$$h_{к} = \frac{2\sigma_{ж,г} \cos\theta}{\rho_{к} \gamma_{ж} g} \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) представляет собой соотношение Борели-Жюрена, в соответствии с которым степень заполнения капилляра находится в обратной зависимости от его радиуса и плотности поглощаемой жидкости.

Концентрация водных растворов солей в кирпичной кладке может варьироваться в различных пределах, что отражается на их плотности. На основании выражения (3.3) можно утверждать, что чем выше концентрация солевого раствора, тем меньше степень заполнения капилляра. Данное предположение проиллюстрировано с помощью модели, состоящей из стеклянных капилляров одинакового сечения, позволяющих визуальную оценку уровня их заполнения солевыми растворами различной концентрации. Для проведения сравнительного анализа были выбраны водные растворы NaCl и Na₂SO₄, поскольку хлориды и сульфаты являются наиболее распространенными видами солей, которые встречаются в кирпичных кладках [28, 83].

На рисунках 3.1 и 3.2 проиллюстрировано влияние концентрации (плотности) водных растворов солей на уровень заполнения капилляров.

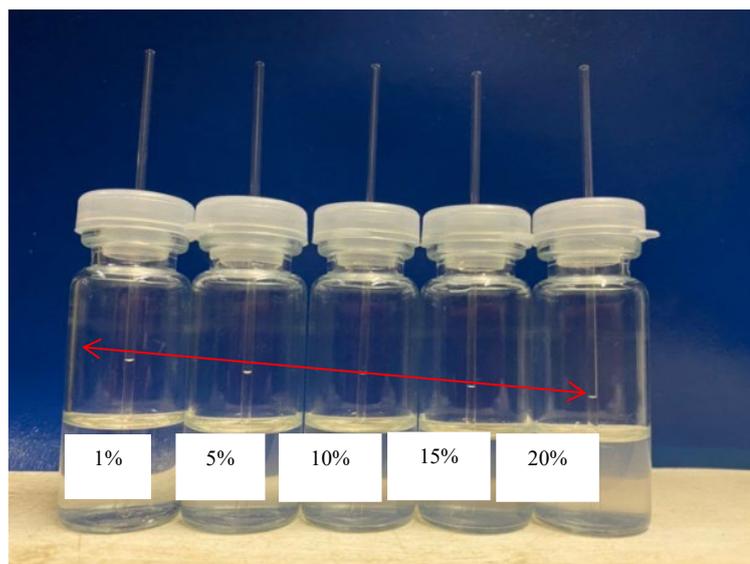


Рисунок 3.1 – Изменение уровня заполнения капилляров для солевого раствора NaCl концентрацией 1%, 5%, 10%, 15%, 20% (слева направо)

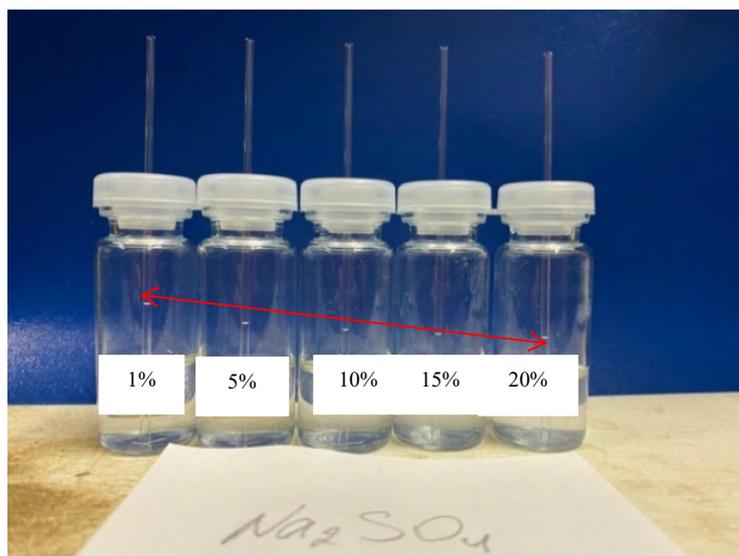


Рисунок 3.2 – Изменение уровня заполнения капилляров для солевого раствора Na_2SO_4 концентрацией 1%, 5%, 10%, 15%, 20% (слева направо)

Представленные физические модели (рисунки 3.1 и 3.2) выступают эмпирическим подтверждением зависимости Борели-Жюрена: степень заполнения капилляров не зависит от химического состава солевого раствора, но обусловлена его концентрацией - чем она выше, тем ниже уровень жидкости в капилляре.

Концентрация раствора напрямую связана с растворимостью соли. При температуре $t = 20^\circ\text{C}$, соответствующей условию проведения испытания, растворимость NaCl в воде выше, чем у Na_2SO_4 на 10,28 массовых процента [15], что упрощает достижение требуемой концентрации. Это позволяет сделать вывод о том, что для последующих исследований в качестве модельного раствора допустимо применение соли NaCl , дополнительными преимуществами которой являются широкая доступность и низкая стоимость.

Заполнение капилляров и дальнейшее перемещение жидкости в структуре материала зависит не только от сил поверхностного натяжения и концентрации раствора, но и от размеров сечений пор. Согласно классификации, принятой в теории адсорбции, поры, содержащиеся в материале в зависимости от их размеров, подразделяют на три группы [16, 43, 45, 46, 56]:

-микропоры - $r < 10^{-9}$ м;

-мезопоры или переходные поры - r от 10^{-9} м до 10^{-7} м;

-макропоры $r > 10^{-7}$ м.

Поры, радиус которых меньше 10^{-7} м, как правило, могут быть заполнены жидкостью в результате процесса сорбции независимо от того являются они сквозными или тупиковыми [43, 45, 91]. Макропоры заполняются только при непосредственном соприкосновении с жидкостью за счет возникновения капиллярных сил. Такие поры не способны сорбировать влагу из воздуха, а наоборот отдают ее в атмосферу. При этом действие капиллярных сил заметно снижается, когда радиус пор превышает 10^{-4} м, поскольку в данном случае значительное влияние на поглощение и миграцию жидкости оказывают силы тяжести. Отсюда следует, что движение жидкостей в структуре капиллярно-пористых тел осуществляется преимущественно по капиллярам, размер которых находится в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-4} м.

Чтобы количественно охарактеризовать поведение жидкости в капиллярно-пористых телах А.В. Лыковым введено понятие о капиллярном потенциале [38, 47]. По аналогии с потенциалом поля тяжести, описываемым выражением (3.4), капиллярным потенциалом называют потенциальную энергию поля капиллярных сил, отнесенных к единице массы жидкости [45]. Указанный параметр для цилиндрических капилляров описывается формулой (3.5):

$$\psi_{п.т.} = \frac{Mgh}{M} = gh \quad (3.4)$$

где: h – высота над уровнем моря, M – масса тела.

$$\psi_k = hg = \frac{2\sigma}{\gamma_{ж}} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (3.5)$$

где: h – степень заполнения капилляра, $\left(\frac{1}{\rho} \right)$ – средняя кривизна мениска.

Значение капиллярного потенциала для смачивающей жидкости отрицательно вследствие вогнутой поверхности мениска, поэтому согласно действию капиллярных сил ее движение будет происходить от низшего значения потенциала к высшему [38, 45, 93]. Другими словами, водные растворы солей будут естественным образом перемещаться из более широких капилляров в более узкие.

Таким образом, в соответствии с формулой (3.5) можно утверждать, что капиллярный переход жидкой фазы из кирпичной кладки в saniрующий раствор достигается в том случае, когда размеры капилляров в поровом пространстве кирпича превышают капилляры в структуре штукатурного покрытия. Это позволит обеспечить миграцию солевых растворов непосредственно в направлении защитного покрытия, предупреждая обратное движение жидкости в кирпичную кладку.

Известно [29, 80], что размеры пор в черепке керамического кирпича варьируются от долей микрона до нескольких миллиметров, что подтверждается экспериментально. Изученная с помощью ртутной порометрии структура керамического полнотелого кирпича, отобранного из эксплуатируемой конструкции, характеризуется порами размер, которых составляет от 10^{-8} до 10^{-4} м, а основная доля пор лежит в интервале от 10^{-6} до 10^{-4} м (рисунок 3.3).

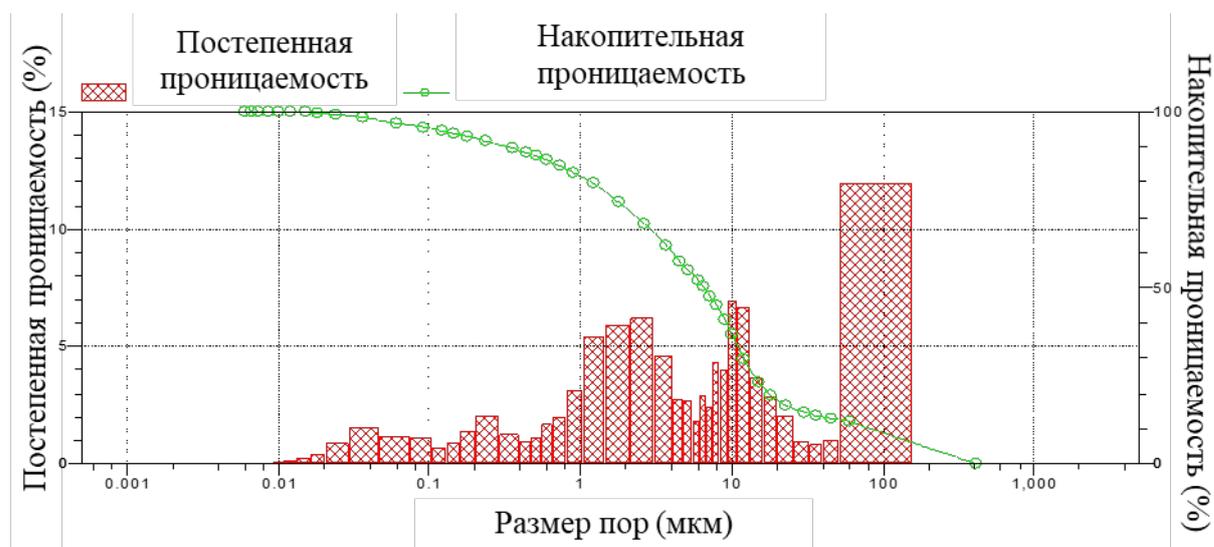


Рисунок 3.3 – Диаграмма распределения размеров пор в керамическом кирпиче

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что 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 диапазоне от 10^{-8} до 10^{-5} м.

Указанные параметры порового пространства защитного раствора могут быть получены при использовании в качестве вяжущего портландцемента. Общеизвестным фактом является то, что в цементном камне в процессе формирования его структуры образуется разветвленная сеть капилляров переменного сечения размерами от 10^{-9} до 10^{-4} м, а также отдельные поры с диаметрами от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-3}$ м [43, 53, 92]. Таким образом, капилляры в объеме цементного раствора сопоставимы по размерам с транспортными порами керамического черепка, что создает условия для запуска механизма, обуславливающего эффект санирования. Поэтому в качестве основного структурообразующего компонента в матрице saniрующего раствора в дальнейших исследованиях настоящей работы принят портландцемент.

Помимо обеспечения перехода солевых растворов из кирпичной кладки в защитный раствор, капиллярная система цементного камня должна также способствовать активному выходу влаги в окружающую среду в газообразном агрегатном состоянии. Это требует соответствующей модификации структуры порового пространства цементного камня в saniрующем растворе.

3.2. Формирование структуры базового состава saniрующего раствора, обеспечивающего проводящую функцию

Применение портландцемента позволяет получить строительные растворы, обладающие высокой механической стойкостью к солевой нагрузке. Вместе с тем нанесение цементных составов на влажные и засоленные кирпичные кладки приводит к накоплению влаги в стенах и отслоению покрытий вследствие низкой паропрооницаемости подобных растворов [119]. Известно, что штукатурные составы на основе известкового вяжущего намного лучше пропускают водяной пар по сравнению с цементными за счет крупнопористой структуры матричной части [117]. Следовательно, можно предположить, что получение матрицы раствора, характеризующегося высокой паропрооницаемостью, возможно за счет использования смешанного цементно-известкового вяжущего.

В настоящей работе в качестве известкового вяжущего рассматривалась известь-пушонка ввиду более высокой однородности свойств и универсальности ее применения. Для определения необходимого количества извести в составе смешанного вяжущего требуется выявление закономерностей влияния ее расхода на такие показатели раствора как паропроницаемость, капиллярное водопоглощение и параметры пористости.

Оценка влияния извести производилась путем модификации базовой цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов по массе равным 1:3. Готовились серии образцов с различным содержанием известкового вяжущего от массы цемента (0%, 3%, 6%, 9%). Линейные размеры образцов для оценки паропроницаемости составляли 100x100x30 мм, для оценки капиллярного водопоглощения были изготовлены образцы-балочки размерами 40x40x160 мм, а для определения параметров пористости (по ГОСТ 12730.4-2020) - образцы-кубы с размерами 70,7x70,7x70,7 мм.

Анализ экспериментальных данных (таблица 3.1) показывает, что введение известкового вяжущего в состав цементно-песчаного раствора приводит к существенному изменению параметров порового пространства. С увеличением содержания извести отмечается рост показателя среднего размера капиллярных пор (λ). За счет этого повышается пористость затвердевшего раствора и как следствие, связанная напрямую с ней, паропроницаемость (рисунок 3.4). Сопоставление значений показателя однородности размеров открытых капиллярных пор (α) с результатами оценки капиллярного водопоглощения (рисунок 3.5) показывает, что оптимальное количество добавки извести в составе цементно-песчаного раствора составляет 6 % от массы цементного вяжущего. При данном расходе известь наиболее равномерно распределяется в объеме растворной матрицы. Последующее увеличение ее содержания до 9 % вызывает снижение капиллярного водопоглощения, что, вероятно, обусловлено увеличением среднего размера капиллярных пор (λ).

Таблица 3.1 Влияние добавки известкового вяжущего на параметры пористости цементно-песчаного раствора

Содержание извести, % от массы цемента	Показатель среднего размера капиллярных пор λ	Показатель однородности размеров открытых капиллярных пор α
0%	2,91	0,55
3%	3,01	0,59
6 %	2,93	0,61
9 %	3,53	0,57

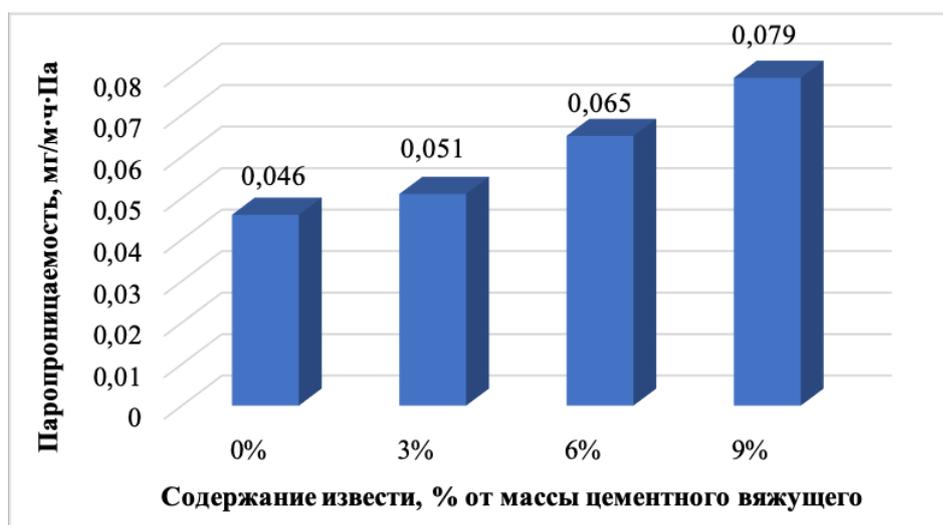


Рисунок 3.4 – Влияние добавки извести на паропроницаемость цементно-песчаного раствора

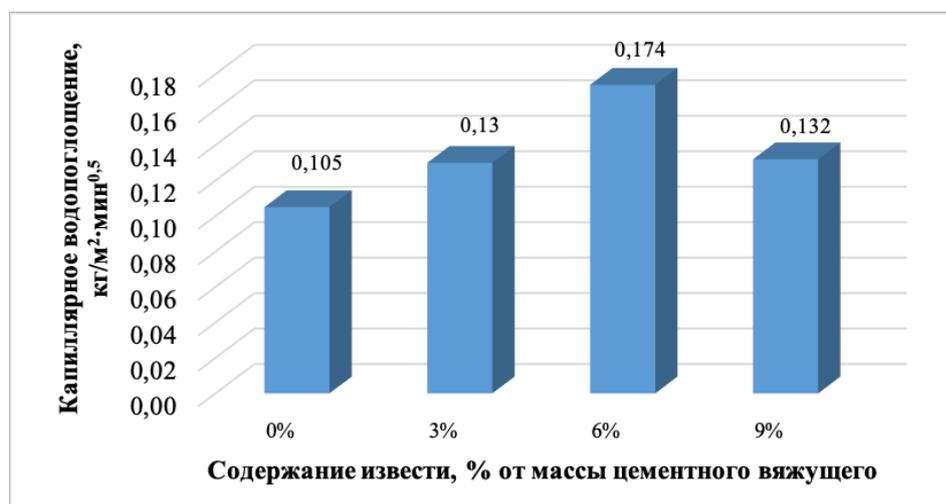


Рисунок 3.5 – Влияние добавки извести на капиллярное водопоглощение цементно-песчаного раствора

Поскольку saniрующие штукатурки являются отделочным материалом, их жесткость не должна превышать жесткость основания [20, 119], что важно с точки зрения сохранения отделочного слоя. Основная задача заключается в обеспечении

совместности работы тонкослойного штукатурного покрытия и массивного основания, каким является кирпичная кладка, при нестационарных воздействиях внешних и внутренних эксплуатационных факторов. Это предполагает близость деформационно-механических свойств раствора и кирпича. Применительно к пределу прочности при сжатии, с учетом обеспечения высокой солестойкости раствора, это соответствует диапазону значений от 12 до 18 МПа. В противном случае избыточная жесткость штукатурного покрытия может привести к неравномерным деформациям и как следствие отслоению отделки от поверхности кладки. Присутствие извести в составе цементно-песчаного раствора помимо улучшения паропроницаемости, позволяет обеспечить уменьшение жёсткости цементной матрицы. В результате чего улучшается деформативность отделочного слоя.

Так как нанесение saniрующих растворов предполагает набрасывание их на вертикальные поверхности ручным способом, дополнительно необходимо обеспечить требуемые технологические свойства растворной смеси. Производительность и низкие потери при набрасывании смеси связаны с водоудерживающей способностью [41]: смеси, характеризующиеся водоудерживающей способностью не менее 90% обладают чрезвычайно малым отскоком от поверхности основания при набрасывании, что определяет удобство их применения.

Для достижения указанной водоудерживающей способности в составе смеси применен минеральный наполнитель. В качестве наполнителя использовался микрокальцит марки КМ-100, оптимальное содержание которого в составе базового раствора определялось по критерию достижения водоудерживающей способности 90-95% в ходе предварительных исследований. В отличие от добавок на основе эфиров целлюлозы применение минерального наполнителя позволяет предотвратить излишнюю липкость смеси к инструменту, что значительно упрощает выравнивание слоя и заглаживание поверхности защитного раствора.

Таким образом, исходя из приведенных выше предпосылок подобран базовый состав saniрующего раствора, обеспечивающий прочность,

сопоставимую с прочностью кладки, технологичность, высокие капиллярное водопоглощение и паропроницаемость. Состав раствора, а также его физико-механические характеристики приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 Состав базового saniрующего раствора

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

Таблица 3.3 Физико-механические характеристики базового saniрующего состава

Физико-механические характеристики	Значение
Водоудерживающая способность, %	95
Средняя плотность $\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	2132
Прочность при сжатии, МПа	19,22
Паропроницаемость, мг/м·ч·Па	0,075
Прочность сцепления (адгезия) раствора с основанием, МПа	0,5

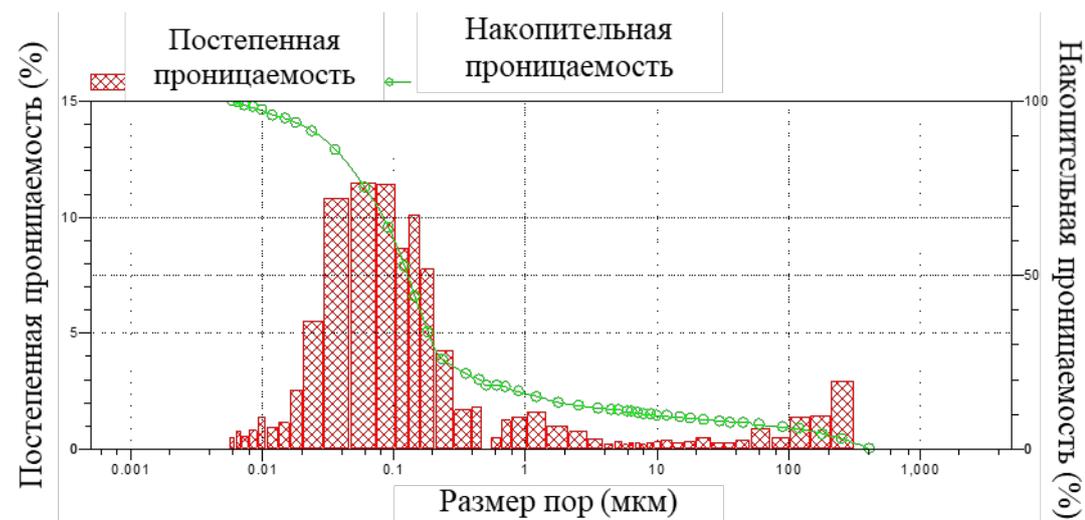


Рисунок 3.6 – Диаграмма распределения размеров пор в цементно-известковом растворе

Дополнительно методом ртутной порометрии исследовано распределение пор по размерам в структуре базового цементно-известкового раствора. Полученные результаты в графическом виде представлены на рисунке 3.6.

Большинство пор в системе цементно-известкового раствора имеет размеры от 10^{-8} до 10^{-6} м. Сопоставляя эти данные с результатами оценки распределения пор в керамическом кирпиче можно отметить, что полученный базовый состав

соответствует условию формирования проводящей структуры: диапазон размеров пор в керамическом кирпиче шире, чем в цементно-известковой системе. Таким образом, подтверждается возможность перехода солевого раствора в капилляры saniрующего материала на основе смешанного цементно-известкового вяжущего.

3.3. Регулирование капиллярной проводимости saniрующего раствора

Эффективность saniрующих растворов напрямую связана с их способностью удерживать в своем объеме водные растворы солей и, таким образом, предотвращать появление высолов на лицевой поверхности кладки или отделки. В связи с этим скорость капиллярного впитывания внутри штукатурного покрытия должна быть ограничена, а поровое пространство содержать достаточное количество пор для свободной кристаллизации солей. Регулировать капиллярное поглощение и обеспечить необходимую структуру защитного покрытия возможно за счет введения в базовый цементно-известковый раствор добавок в виде пористых мелкозернистых заполнителей [83]. При выборе данных материалов необходимо учитывать, что их поры должны быть доступны для солевых растворов и водяных паров, а объем этих пор способен обеспечить дополнительное пространство для накопления солевых отложений [42].

Анализ номенклатуры пористых заполнителей, доступных в настоящее время на рынке строительных материалов и сырья, показал, что в качестве искомых компонентов saniрующего раствора наиболее рационально рассмотреть перлитовый и керамзитовый пески, гранулированное пеностекло, а также вспученный вермикулит, которые изготавливаются в промышленных масштабах.

Поскольку вермикулит имеет слоистую структуру, образующую плоские поры протяженностью $1,5 \cdot 10^{-4}$ м и шириной не более $1,5 \cdot 10^{-5}$ м, [83] его использование в качестве заполнителя в saniрующей штукатурке носит ограниченный характер. Подобная структура отличается высокой дефектностью и представляется менее эффективной с точки зрения блокирования пор. Однако это не исключает возможность рассмотрения данного заполнителя в дальнейшем.

Керамзитовый песок отличается ячеистой структурой пор с выраженной капиллярной активностью, в связи с чем, его поровый объем доступен для растворов солей и водяных паров, что благоприятно в контексте кристаллизации солей. С другой стороны, исходя из литературных данных, поры в керамзите сопоставимы с порами в керамическом черепке, и как следствие являются достаточно проницаемыми. Помимо прочего, высокая неоднородность свойств материала, получаемого вторичным способом в рамках производства керамзитового гравия и щебня, ограничивает его применение в качестве пористого компонента saniрующего состава. При дроблении крупных и негабаритных фракций керамзита производимый керамзитовый песок не имеет спекшейся наружной оболочки, насыпная плотность материала возрастает почти вдвое, а зерновой состав часто отличается значительным количеством пылевидной фракции – все это накладывает ограничения на его использование [13, 41, 55, 61].

На основании вышеизложенного наиболее перспективными пористыми заполнителями, для рассмотрения в качестве регуляторов капиллярного движения жидкости в системе цементно-известкового базового раствора, приняты перлитовый песок и гранулированное пеностекло. Указанные материалы имеют выраженные структурные различия (таблица 3.4), что подтверждается данными, полученными с помощью ртутной порометрии (рисунок 3.7 и рисунок 3.8).

Таблица 3.4 Сравнение различных видов пористых заполнителей

Характеристики	Вид пористого заполнителя			
	Гранулированное пеностекло	Керамзитовый песок	Перлитовый песок	Вспученный вермикулит
Объёмное водопоглощение, %	2-15	8-20	30-40	не более 300
Преобладающий вид пористости	Закрытая		Открытая	
Смачиваемость структуры	Не смачиваемая		Смачиваемая	

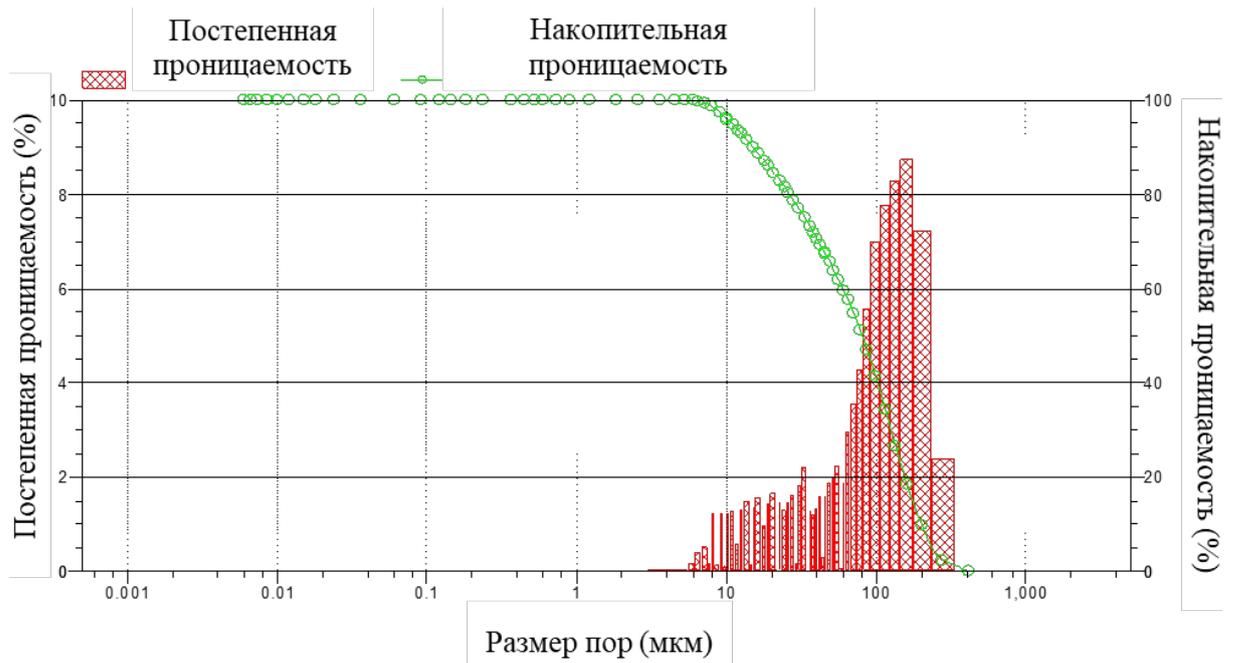


Рисунок 3.7 – Диаграмма распределения размеров пор в зернах перлитового песка

Зерна перлита характеризуются шарообразными и полиэдрическими порами размеры которых находятся в диапазоне от 10^{-5} м до 10^{-3} м. Преимущественно это поры открытого типа, что обуславливает высокую поглощающую способность заполнителя [48, 75, 83]. В свою очередь, гранулы пеностекла отличаются низкой водопотребностью [21, 22, 35, 36, 40, 54, 65, 67, 81], вследствие преобладания в структуре замкнутых пор сферической и гексагональной формы размерами от 10^{-8} до 10^{-6} м.

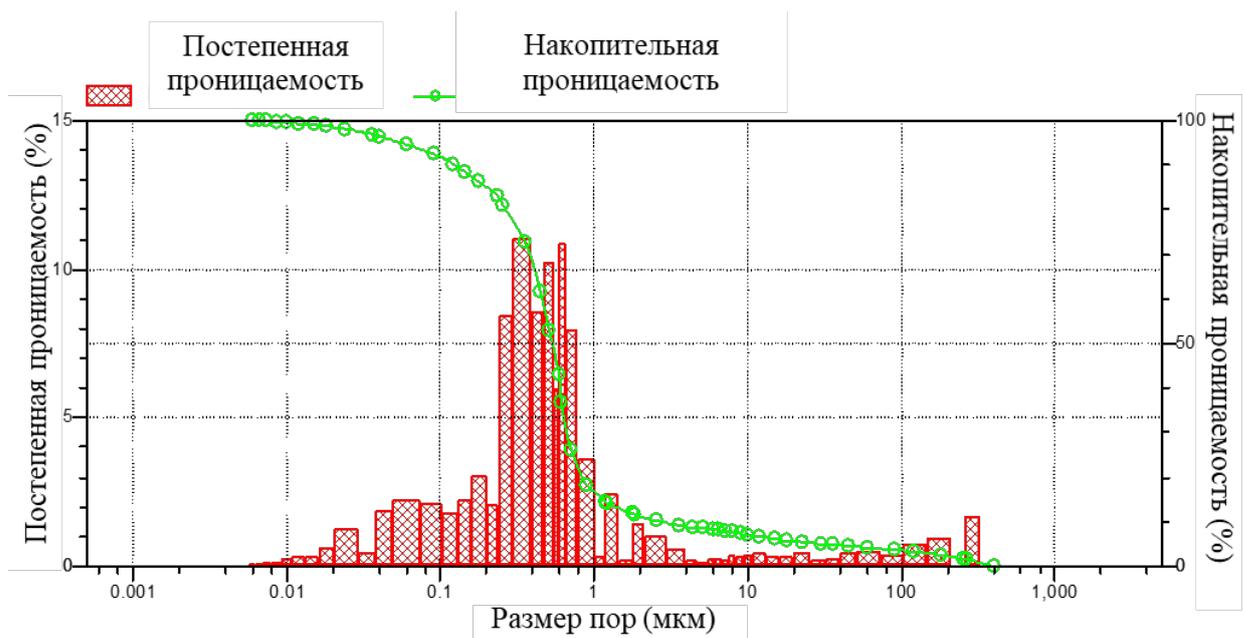


Рисунок 3.8 – Диаграмма распределения размеров пор в гранулах пеностекла

Рассматриваемые заполнители имеют схожий химический состав (таблица 3.5). Анализ различных исследований, посвященных применению перлита и пеностекла в цементных композициях, свидетельствует об устойчивости данных заполнителей к щелочной среде цементного камня и воздействию водорастворимых солей. Так, введение перлита в цементные системы способствует повышению стойкости последних к растворам Na_2SO_4 и NaCl [99, 107, 111]. Отмечается, что благодаря высокой реакционной активности зерна перлита способны вступать во взаимодействие с щелочной средой цемента с образованием гидросиликатов кальция – основного структурного компонента цементного камня [18,51].

Таблица 3.5 Химический состав пористых заполнителей

Вид заполнителя	Химический состав, %						
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	CaO	MgO
Перлит	70-75	12-14	3-5	3-5	до 1	до 1	до 1
Пеностекло	70-73	2-5	14-15	1,5-2	0,1-0,8	5-7	2-4

В отношении пеностекла многими исследователями обнаруживается достаточно высокая вероятность возникновения щелоче-силикатного взаимодействия при введении заполнителя в цементные системы. Однако, в большинстве случаев указанный процесс может протекать скрыто, то есть без возникновения внутренних напряжений в материале. Обусловлено это тем, что ячеистая структура гранулированного пеностекла способна частично компенсировать деструктивное течение щелоче-силикатного взаимодействия за счет накопления продуктов реакции (силикатного геля) в порах заполнителя. Данный механизм является следствием нарушения структуры и образования трещин в стенках пеностекольных гранул [58, 64]. При этом стоит отметить, что степень разрушения пористого заполнителя будет зависеть от концентрации щелочи, которая определяется как соотношением между реагирующими компонентами, так и условиями эксплуатации материала (поступление щелочей из окружающей среды) [50, 64].

Описанное поведение пористых заполнителей в цементных системах не будет оказывать существенного воздействия на механизм санирования, однако

может повлиять на степень долговечности защитных покрытий. Таким образом, использование перлита и пеностекла в составе сухой штукатурной смеси в качестве компонентов, регулирующих капиллярное поглощение и обеспечивающих дополнительное пространство для накопления солей, соответствует критерию пригодности.

Предполагается, что встраиваясь в цементно-известковую матрицу базового раствора гранулы пеностекла и зерна перлита будут способствовать прерыванию сквозных связей в хаотичной системе образующихся капилляров. Как следствие будет сдерживаться капиллярный транспорт водных растворов солей к лицевой поверхности отделки, что схематично отображено на рисунке 3.9.

Сформулированное предположение косвенно подтверждается данными о влиянии пористых заполнителей, вводимых в состав базового saniрующего раствора взамен части песка по объему, на параметры порового пространства.

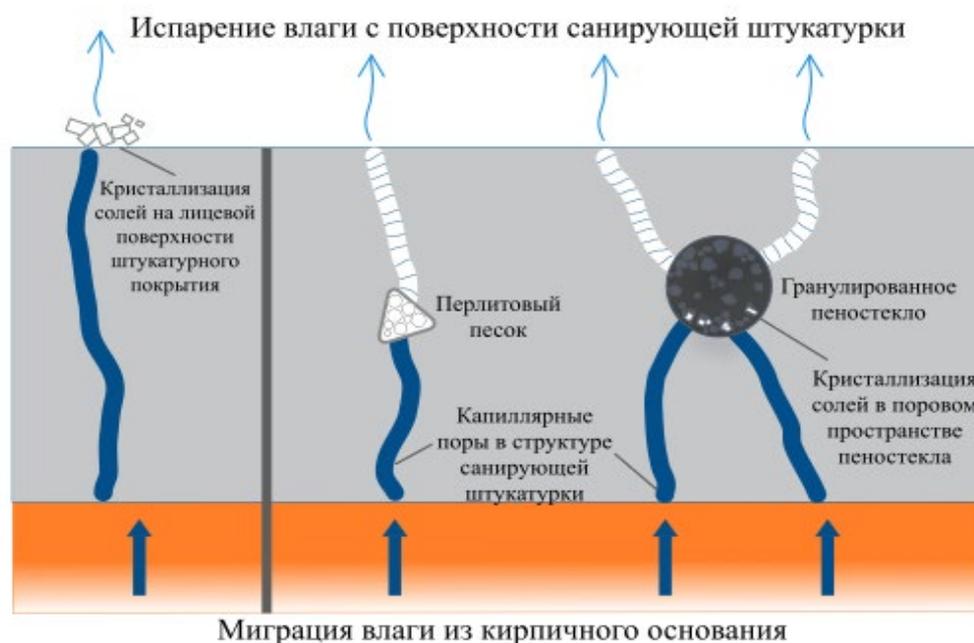


Рисунок 3.9 – Схематическое отражение влияния пористых заполнителей на механизм работы saniрующего раствора

Согласно результатам, представленным в графическом виде (рисунок 3.10 и рисунок 3.11) с увеличением доли как перлита, так и пеностекла происходит снижение показателя однородности размеров открытых капиллярных пор, что может быть обусловлено локальным встраиванием заполнителей в матричную систему базового раствора. Параллельно отмечается значительное возрастание

показателя среднего размера капиллярных пор (рисунок 3.12 и рисунок 3.13), что, по-видимому, можно связать с формированием так называемых четочных капилляров. Отличительной особенностью последних является попеременное расширение и сужение радиуса капилляра, что позволяет достичь не одного, а нескольких равновесных состояний уровня жидкости [45, 89]. Если четочный капилляр погрузить в смачивающую жидкость, то степень его заполнения будет соответствовать наибольшему радиусу, то есть расширению. При этом, если указанный капилляр полностью поместить в жидкость, а затем вынуть так, чтобы нижняя часть осталась в ней, то уровень столба жидкости установится в месте сужения (рисунок 3.14).

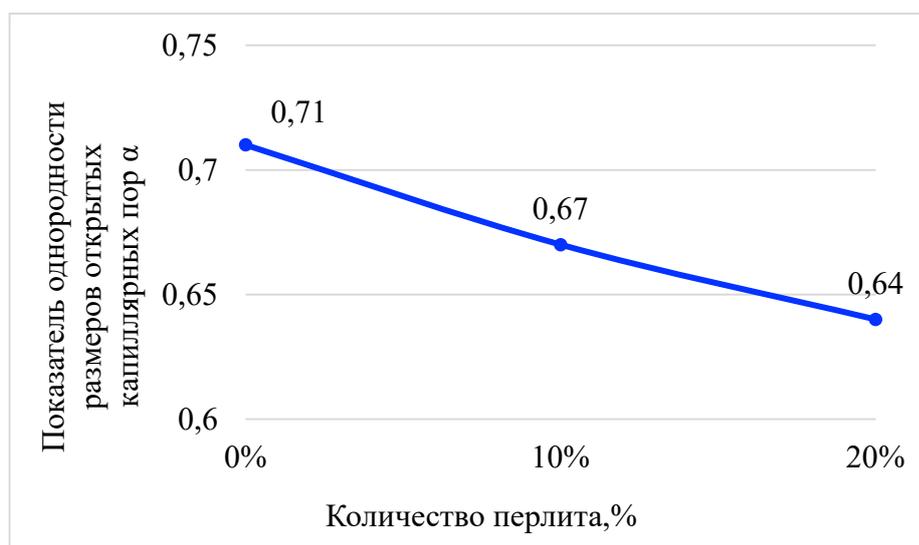


Рисунок 3.10 – Влияние количества перлита на изменение показателя однородности размеров открытых капиллярных пор α в структуре базового цементно-известкового раствора

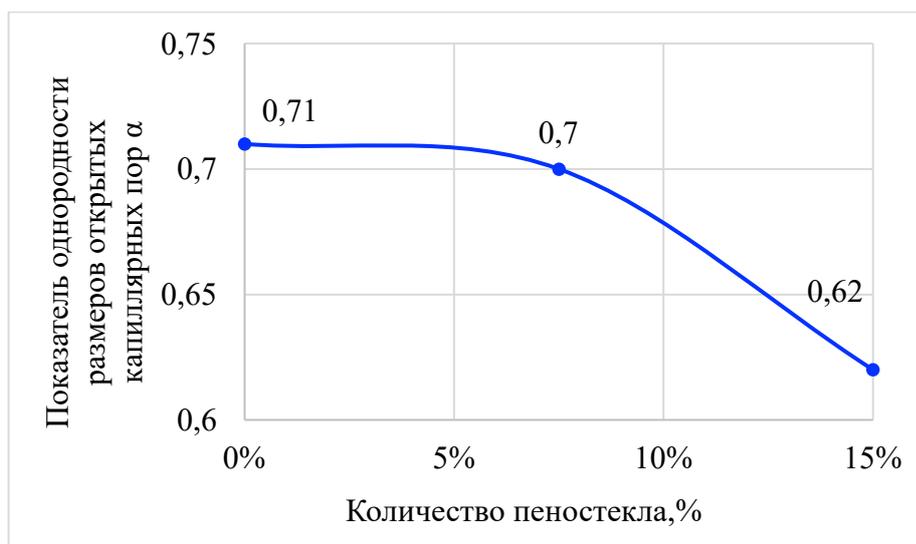


Рисунок 3.11 – Влияние количества пеностекла на изменение показателя однородности размеров открытых капиллярных пор α в структуре базового цементно-известкового раствора

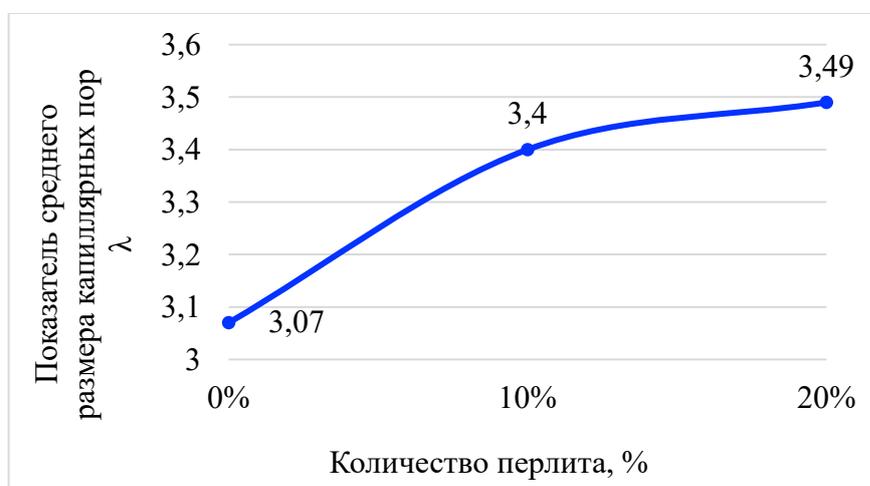


Рисунок 3.12 – Влияние количества перлита на изменение показателя среднего размера капиллярных пор λ в структуре базового цементно-известкового раствора

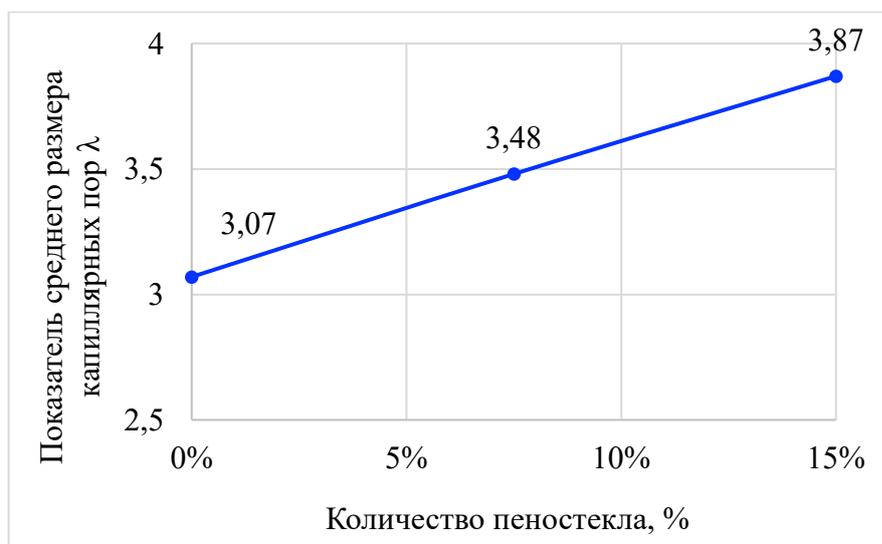


Рисунок 3.13 – Влияние количества пеностекла на изменение показателя среднего размера капиллярных пор λ в структуре базового цементно-известкового раствора

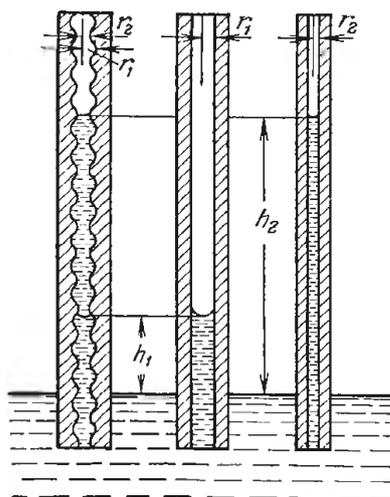


Рисунок 3.14 – Равновесие жидкости в четочном капилляре

Принимая во внимание особенности поведения жидкости в четочных капиллярах и структурные различия пористых заполнителей можно спрогнозировать дальнейший механизм блокирования солевых растворов в объеме защитного покрытия. Предполагается, что в условиях непрерывного притока влаги в кирпичную кладку структура saniрующей штукатурки будет перманентно насыщена водными растворами солей. Последние, мигрируя по сети капилляров, размер которых колеблется от 10^{-8} м до 10^{-6} м, сдерживаются гранулами пеностекла

и зернами перлита, встроенными в матрицу штукатурного раствора и выступающими в роли своеобразных расширений.

Поскольку размеры пор в перлите значительно больше, чем в растворной матрице поглощение солевых растворов заполнителем будет затруднено, несмотря на то что в структуре материала преобладает открытый вид пористости. Ввиду того, что движение жидкости направлено к плоскости испарения, а зерна перлита обладают паропроницаемостью, удаление избыточной влаги будет осуществляться посредством диффузии водяных паров через поры заполнителя. Таким образом, одновременно обеспечивается сдерживание движения солевых растворов, испарение капиллярной жидкости, поступающей в штукатурный слой, и направленная кристаллизация солевых отложений в системе пор перлита, что должно иметь положительный эффект с точки зрения защитных функций saniрующего покрытия.

В отношении пеностекла совпадение размеров пор структуры заполнителя с порами в растворной части штукатурки не определяет процесс поглощения водных растворов солей. В большей степени на это влияет вид пористости материала. Для указанного заполнителя характерна замкнутая система пор с ячеистой структурой, благодаря чему поверхность гранул пеностекла условно можно рассматривать как несмачиваемую, то есть обладающую минимальной поглощающей способностью. Однако при интенсивном насыщении кладки и постоянной миграции влаги к поверхности испарения солевые растворы могут преодолевать данный барьер, накапливаясь преимущественно в поверхностном слое гранул [40]. Дополнительно при таком воздействии может нарушаться целостность разделительных стенок между ячейками в структуре пеностекла, что увеличивает проницаемость заполнителя [22, 54]. Процесс кристаллизации солей, предположительно также как и в случае с перлитовым песком, будет протекать внутри порового пространства пеностекольных гранул, а излишки влаги испаряться в условиях заданной паропроницаемости материала.

В случаях, когда степень увлажнения кирпичной кладки значительно снижена (приняты меры по восстановлению гидроизоляции) или насыщение

влажностью носит периодический характер, заполнение системы капилляров saniрующего покрытия водными растворами солей также ограничивается зернами заполнителя. Однако, интенсивность описанных ранее процессов будет значительно слабее и как следствие продолжительность эксплуатационного ресурса защитного отделочного слоя должна возрасти.

На основании предварительных исследований структуры и свойств выбранных заполнителей, можно предположить, что зерна перлита и гранулы пеностекла способны блокировать капиллярный транспорт водных растворов солей в системе штукатурного раствора. Сдерживая миграцию жидкости к поверхности испарения, легкие заполнители различным способом обеспечивают удаление излишней влаги и запирают солевых отложений в своем поровом пространстве. Таким образом, подтверждается возможность создания штукатурного покрытия, структура которого будет обладать saniрующими свойствами.

Выводы по третьей главе

1) Естественный однонаправленный капиллярный переход водных растворов солей из кирпичной кладки в структуру порового пространства saniрующей штукатурки обеспечивается в случае, когда диапазон размеров пор в растворной матрице значительно меньше, чем в керамическом кирпиче и не превышает по верхнему ограничению 10^{-5} м.

2) Применение смешанного цементно-известкового вяжущего позволяет получить матрицу saniрующего раствора, обладающую проводящей функцией с размерами капиллярных пор от 10^{-8} м до 10^{-6} м. Сформированная таким образом структура порового пространства растворной части способна обеспечить переход солевых растворов из кирпичной кладки в защитный слой, а также обладает высокой паропроницаемостью, что создает благоприятные условия для выхода избыточной влаги в виде водяного пара.

3) Эффективность saniрующих растворов напрямую зависит от их способности удерживать в своем объеме водные растворы солей, не допуская

появления солевых отложений на поверхности кладки или отделки. Добиться подобного эффекта возможно путем ограничения скорости капиллярного впитывания в структуре штукатурного покрытия за счет введения в матрицу раствора мелкозернистых пористых заполнителей.

4) На основании предварительных исследований перлитовый песок и гранулированное пеностекло являются наиболее подходящими материалами, для введения в состав сухой штукатурной смеси с целью регулирования капиллярного движения водных растворов солей в структуре saniрующего покрытия. Действие выбранных заполнителей на изменение параметров порового пространства растворной матрицы обладает равнозначным эффектом, то есть они способны прерывать сквозные связи в хаотичной системе образующихся капилляров. Однако, вследствие структурных отличий механизм поглощения водных растворов солей гранулированным пеностеклом и зернами перлитового песка будет различным.

4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ САНИРУЮЩИХ ШТУКАТУРНЫХ СМЕСЕЙ

4.1. Планирование двухфакторного трехуровневого эксперимента

Исследование влияния мелкозернистых пористых заполнителей на формирование структуры и свойств затвердевшего штукатурного раствора проводилась посредством метода математического планирования эксперимента. На основе полученного базового состава проектировались сухие смеси, охватывающие определенный диапазон содержания гранулированного пеностекла и перлитового песка.

Согласно априорной информации, произведен выбор переменных факторов и функций отклика, составлен план эксперимента. В качестве основных переменных факторов приняты расходы перлита (X1) и пеностекла (X2). Указанные материалы вводились в составы смесей с заменой соответствующего объема строительного песка. Уровни варьирования пористых заполнителей в соответствии с планом двухфакторного трехуровневого эксперимента приведены в таблице 4.1. Расход перлита и пеностекла в исследуемых растворах представлен в таблице 4.2

Таблица 4.1 План двухфакторного трехуровневого эксперимента

Фактор	Код	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		Нижний	Средний	Верхний	
Расход перлита, % от объема песка	X1	0	10	20	10
Расход пеностекла, % от объема песка	X2	0	7,5	15	7,5

Таблица 4.2 Расход пористых заполнителей в исследуемых составах сухих санитарующих смесей

Расход пористого заполнителя, % от объема песка	№ состава										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перлитовый песок	20	20	-	-	20	-	10	10	10	10	10
Гранулированное пеностекло	15	-	15	-	7,5	7,5	15	-	7,5	7,5	7,5

В качестве функций отклика рассмотрены ключевые эксплуатационные характеристики затвердевших растворов, к которым отнесены: капиллярное поглощение, поверхностное поглощение, солестойкость, предел прочности при сжатии и средняя плотность.

4.2. Количественная оценка влияния пористых заполнителей на ключевые эксплуатационные характеристики растворов

Результаты эмпирической оценки ключевых эксплуатационных характеристик затвердевших растворов, изготовленных на основе разработанных сухих смесей представлены в сводной таблице 4.3. На основании полученных данных вычислены регрессионные и построены графические зависимости, отражающие влияние пористых заполнителей на изменение указанных выше параметров.

Уравнения регрессии и их графические отображения (рисунок 4.1 и 4.2), выражающие зависимость предела прочности при сжатии и средней плотности от количества пористых заполнителей имеют следующий вид:

$$\rho_{\text{ср.}} = 1960,26 - 22,33X_1 - 107,83X_2 + 6,44X_1^2 + 23,94X_2^2 + 19,00X_1X_2 \quad (4.1)$$

$$R_{\text{сж.}} = 14,56 - 0,51X_1 - 2,86X_2 - 0,05X_1^2 + 0,71X_2^2 + 0,93X_1X_2 \quad (4.2)$$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в рассматриваемых диапазонах расхода пористых заполнителей с увеличением их количества в составе сухих смесей происходит закономерное снижение как плотности, так и прочности затвердевших растворов. При максимальном расходе перлитового песка (20%) сокращение величины средней плотности не превышает 4%, а предел прочности при сжатии уменьшается не более чем на 15%. С увеличением доли гранулированного пеностекла (15%) отмечается снижение средней плотности на 12%, в то время как падение прочности составляет 39%. Описанный эффект вызван сокращением доли плотного заполнителя в штукатурной системе. При этом снижение рассматриваемых характеристик в значительной мере обусловлено наличием в составе растворов гранулированного пеностекла, чем перлитового песка. Причина такого изменения может быть связана с высокой водопотребностью

перлита [34], которая способствует уменьшению истинного водоцементного отношения (В/Ц) в твердеющей системе.

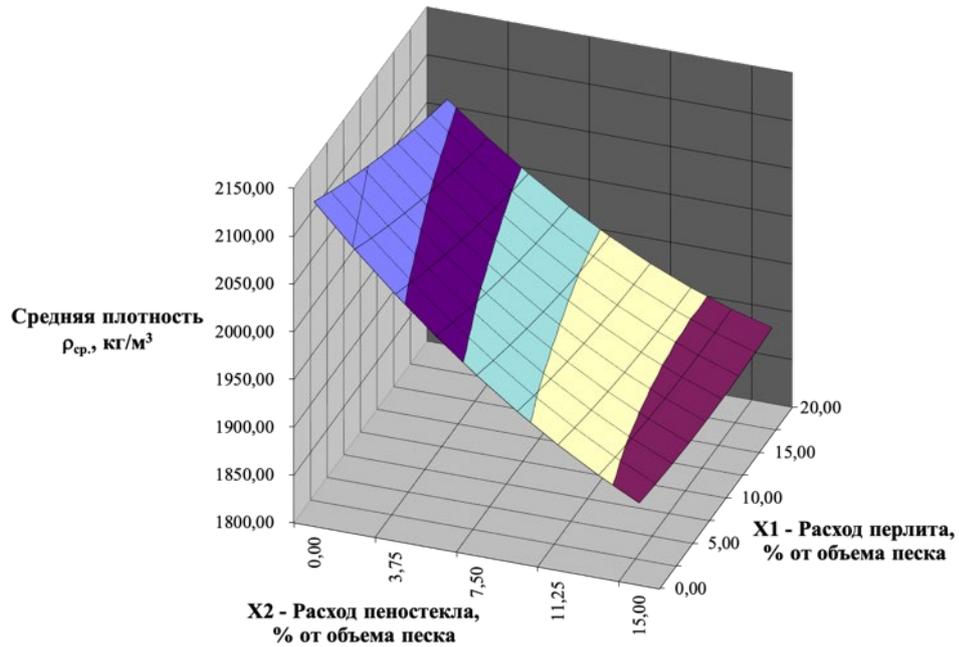


Рисунок 4.1 – Зависимость средней плотности saniрующих составов от расхода пористых заполнителей

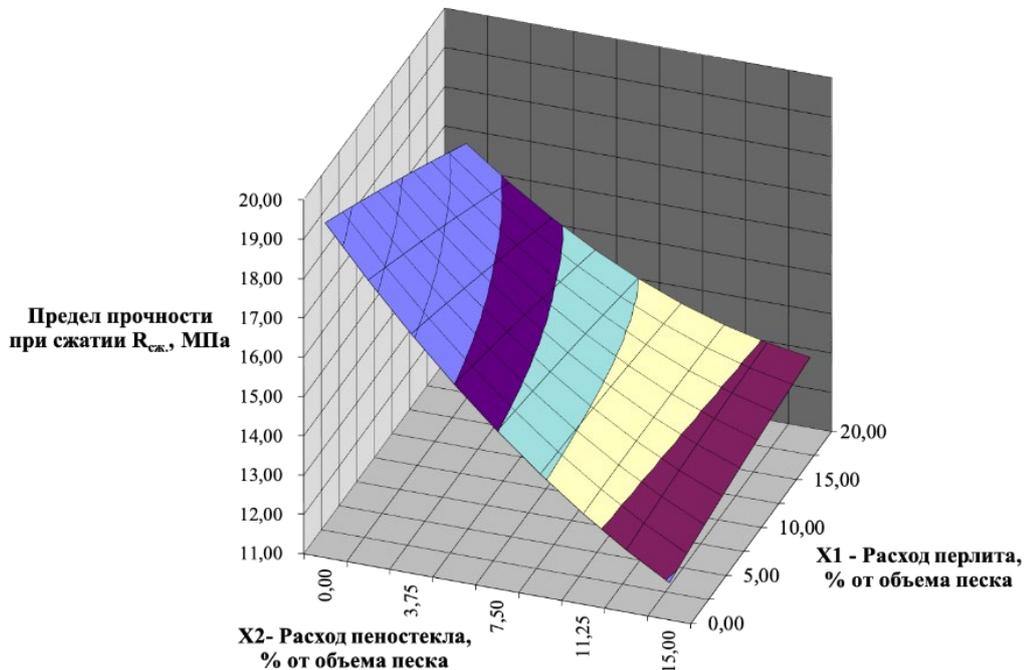


Рисунок 4.2 – Зависимость предела прочности при сжатии saniрующих составов от расхода пористых заполнителей

Таблица 4.3 Результаты эмпирической оценки ключевых эксплуатационных характеристик затвердевших растворов

№ состава	Матрица плана в кодах		Матрица плана в натуральных величинах		$\rho_{\text{ср.}}, \text{кг/м}^3$		$R_{\text{сж.}}, \text{МПа}$		$W_{\text{кап.}},$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}^{0,5})$		$W_{\text{пов.}},$ $10^{-3} \text{м}/\text{мин}^{0,5}$		Солестойкость, % потери массы	
	X1	X2	X1	X2	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.
1	1	1	20	15	1869	1879	12,97	12,79	0,184	0,18	0,152	0,15	5,58	6,06
2	1	-1	20	0	2043	2057	16,76	16,65	0,186	0,18	0,211	0,21	4,27	4,41
3	-1	1	0	15	1882	1886	11,72	11,95	0,212	0,21	0,169	0,17	6,43	6,32
4	-1	-1	0	0	2132	2139	19,22	19,52	0,204	0,21	0,203	0,20	5,02	4,57
5	1	0	20	7,5	1969	1944	13,72	14,01	0,181	0,19	0,166	0,16	6,32	5,69
6	-1	0	0	7,5	2001	1989	15,54	15,02	0,218	0,21	0,165	0,16	5,34	5,90
7	0	1	10	15	1891	1876	12,47	12,42	0,210	0,21	0,165	0,17	7,30	6,93
8	0	-1	10	0	2114	2092	18,32	18,13	0,204	0,21	0,220	0,21	4,92	5,23
9	0	0	10	7,5	1929	1960	14,46	14,56	0,210	0,21	0,162	0,17	6,33	6,53
10	0	0	10	7,5	1932	1960	14,20	14,46	0,217	0,21	0,160	0,17	6,93	6,53
11	0	0	10	7,5	1910	1960	14,32	14,46	0,203	0,21	0,164	0,17	6,15	6,53

Несмотря на то, что показатели средней плотности и предела прочности при сжатии позволяют косвенно оценить изменение структуры материала за счет использования пористых заполнителей, они являются недостаточными для определения эффективности защитных свойств saniрующих покрытий. Для этой цели необходимо рассмотреть параметры, связанные с поглощением и транспортировкой водных растворов солей, а именно капиллярное и поверхностное впитывание.

Математические зависимости, описывающие связь между количеством пористых заполнителей и изменением названных характеристик представлены ниже с помощью уравнений регрессии:

$$W_{\text{кап.п.}} = 0,210 - 0,014X_1 + 0,002X_2 - 0,011X_1^2 - 0,003X_2^2 - 0,003X_1X_2 \quad (4.3)$$

$$W_{\text{пов..п.}} = 0,167 - 0,001X_1 - 0,025X_2 - 0,005X_1^2 + 0,022X_2^2 - 0,006X_1X_2 \quad (4.4)$$

Графическое отображение полученных зависимостей проиллюстрировано на рисунках 4.3 и 4.4:

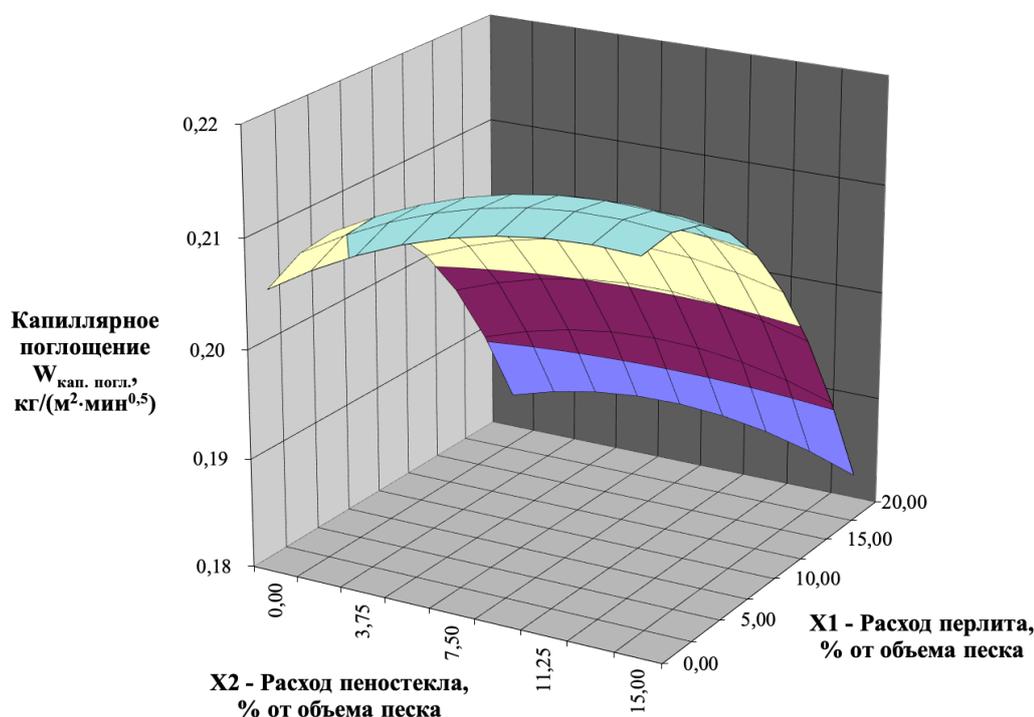


Рисунок 4.3 – Зависимость капиллярного поглощения saniрующих составов от расхода пористых заполнителей

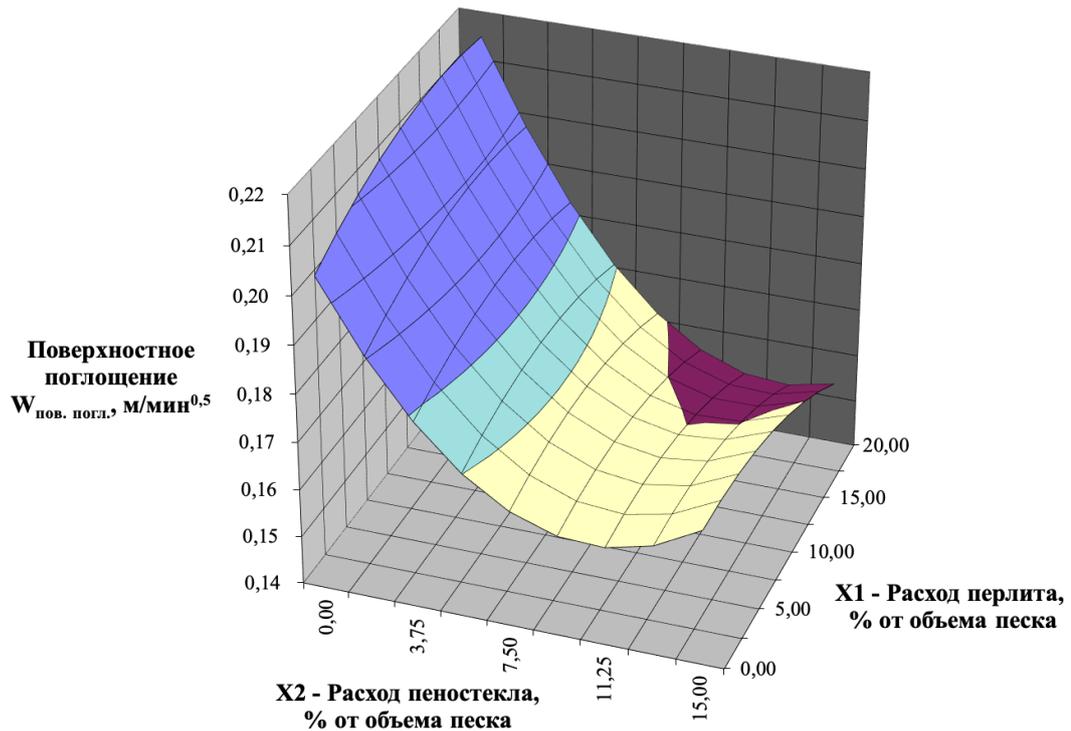


Рисунок 4.4 – Зависимость поверхностного поглощения saniрующих составов от расхода пористых заполнителей

Согласно приведенным зависимостям, наибольший показатель капиллярного поглощения имеет место при расходе гранулированного пеностекла 7,5%, тогда как предельное значение поверхностного поглощения достигается за счет введения перлитового песка в количестве 10%. Наименьшие значения указанных параметров наблюдаются при совместном применении пористых заполнителей, что для капиллярного поглощения соответствует расходу перлита и пеностекла в количестве 20% и 7,5%, а для поверхностного поглощения – 20% и 15%.

Полученные данные свидетельствуют о разнонаправленном действии пористых заполнителей на параметры, связанные с поглощением и транспортировкой водных растворов солей. Изменение капиллярного поглощения в большей степени обусловлено расходом перлитового песка, в то время как величина поверхностного поглощения зависит от количества гранулированного пеностекла, что подтверждается коэффициентами уравнений регрессии.

Для более детального анализа указанных результатов дополнительно построены графики зависимостей капиллярного и поверхностного поглощений от

принятого количества пористых заполнителей при фиксированном расходе одного вида заполнителя и вариации другого (рисунки 4.5 – 4.8).

Из рисунка 4.5 видно, что введение в состав штукатурной смеси перлитового песка приводит к росту величины поверхностного поглощения, который, вероятно, обусловлен высокой сорбционной активностью материала. Максимальный прирост данного вида поглощения составляет 8% и, как отмечалось ранее, соответствует расходу перлита в 10%. Дальнейшее увеличение доли заполнителя в составе смеси сопровождается понижением рассматриваемого параметра, однако относительно базового состава тенденция повышения поверхностного поглощения сохраняется.

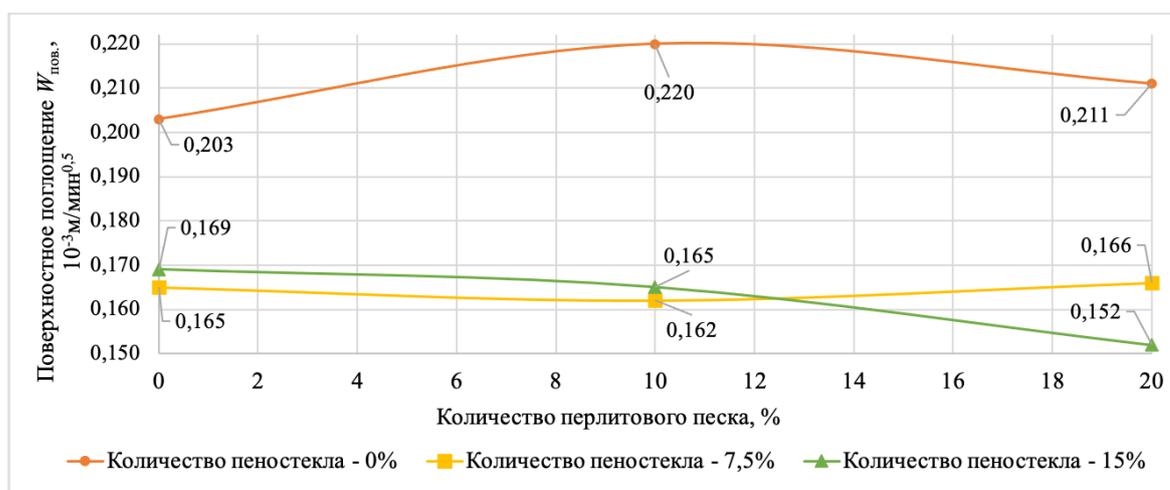


Рисунок 4.5 – График изменения поверхностного поглощения saniрующих составов от количества перлитового песка

При рассмотрении влияния перлитового песка на изменение капиллярного поглощения (рисунок 4.6) установлено, что с увеличением доли пористого заполнителя происходит снижение указанного показателя в диапазоне от 9% до 17%. Наблюдаемый эффект обусловлен разностью между размером пор в зернах перлита и капиллярных пор в растворной матрице, что сдерживает дальнейшую миграцию солевых растворов, поскольку поры в заполнителе крупнее пор в растворе. Дополнительно нарушается однородность в хаотичной системе капилляров за счет встраивания в структуру матрицы инородных включений в виде зерен перлитового песка. Таким образом, подтверждается предположение о том, что данный вид пористого заполнителя выступает естественным барьером,

ограничивающим движение водных растворов солей в капиллярной сети штукатурного слоя. Следовательно, при введении в состав сухой saniрующей смеси перлита, обеспечивается высокая впитывающая способность и ограничивается скорость капиллярной проводимости защитного покрытия.

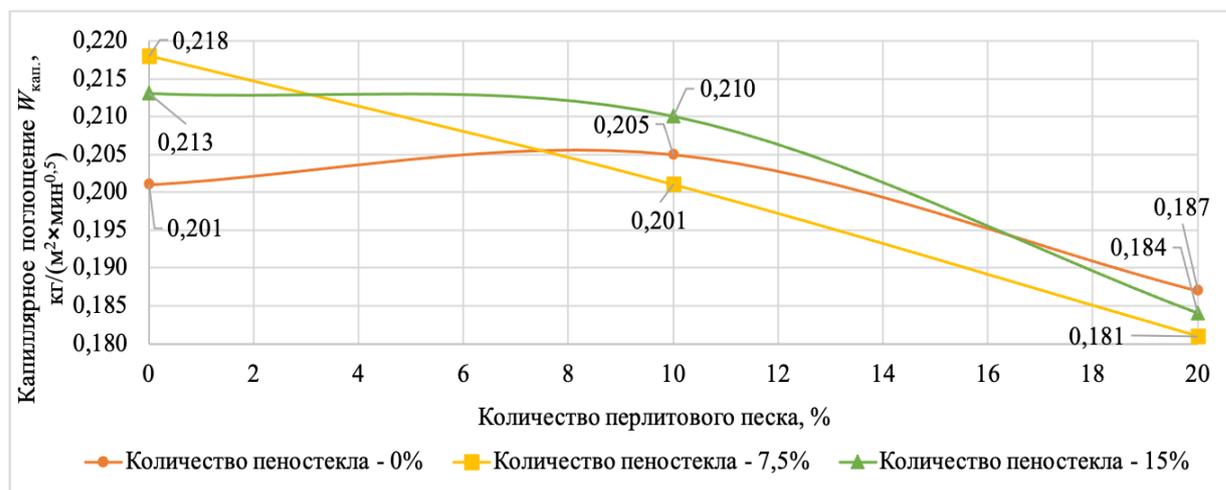


Рисунок 4.6 – График изменения капиллярного поглощения saniрующих составов от количества перлитового песка

Однако, стоит отметить, что в условиях интенсивного притока влаги в кирпичную кладку с высокой степенью засоленности существует вероятность довольно быстрого заполнения пор в зернах перлита кристаллами солей. Последние в силу своей гигроскопичности могут способствовать дальнейшему распространению и выносу солевых растворов на лицевую поверхность отделочного слоя. Поэтому при использовании данного вида заполнителя необходимо учитывать важную роль оптимальной толщины saniрующего покрытия, при которой будет обеспечиваться его защитная функция на время межремонтного периода.

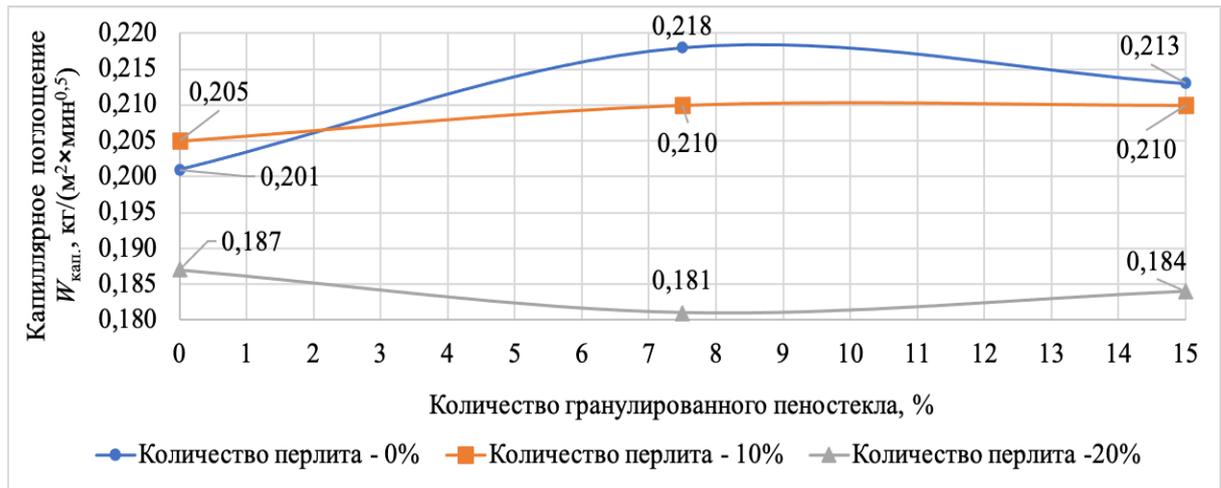


Рисунок 4.7 – График изменения капиллярного поглощения saniрующих составов от количества пеностекла

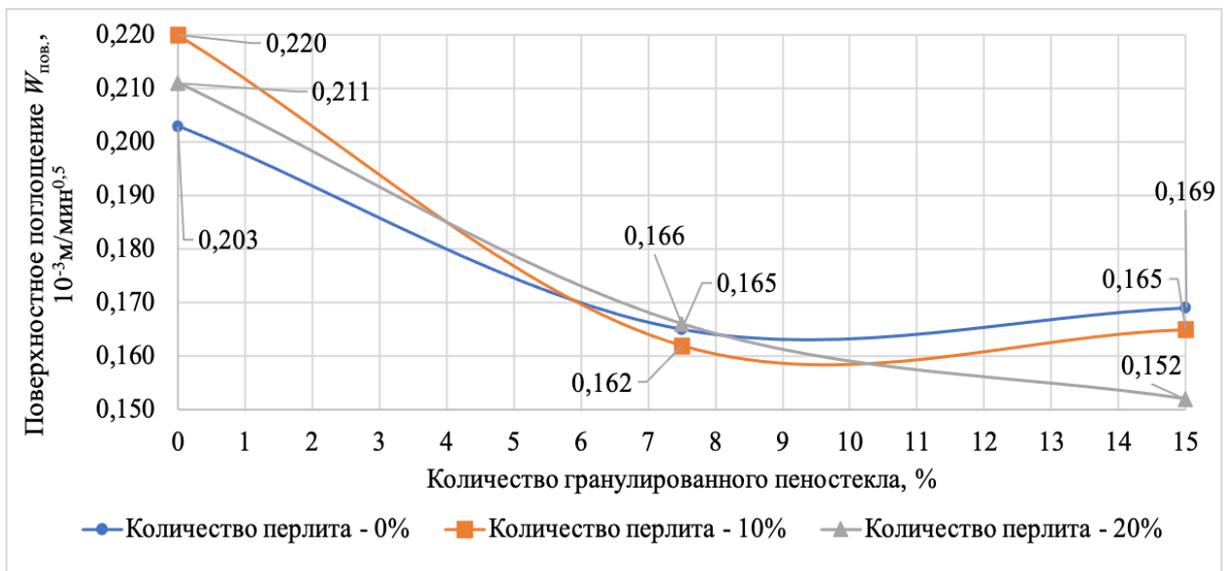


Рисунок 4.8 – График изменения поверхностного поглощения saniрующих составов от количества пеностекла

В исследуемом диапазоне расхода гранулированного пеностекла действие заполнителя имеет обратный эффект: капиллярное поглощение повышается в диапазоне от 3% до 7% (рисунок 4.7), а величина поверхностного поглощения снижается от 17% до 28% (рисунок 4.8). Полученные результаты свидетельствуют о том, что гранулы пеностекла, поверхность которых характеризуется как несмачиваемая, все же имеют достаточную открытую пористость, обеспечивающую капиллярный транспорт водных растворов солей через структуру материала. Поэтому данный вид заполнителя малоэффективен в качестве

компонента, ограничивающего скорость капиллярного движения внутри штукатурного покрытия. Однако, при постоянном воздействии влаги, поры в гранулах пеностекла, сопоставимые по размерам с капиллярами в цементно-известковой матрице, могут рассматриваться с точки зрения «резервуаров», увеличивающих объем свободного пространства для аккумуляции солевых отложений. Следовательно, повышение капиллярного поглощения за счет введения пеностекла может быть рассмотрено как положительный эффект в аспекте обеспечения солестойкости.

Влияние пористых заполнителей на изменение солестойкости рассматриваемых составов представлено уравнением (4.5) и на рисунке 4.9.

$$C = 6,42 + 0,033X_1 + 0,967X_2 - 0,611X_1^2 - 0,311X_2^2 + 0,150X_1X_2 \quad (4.5)$$

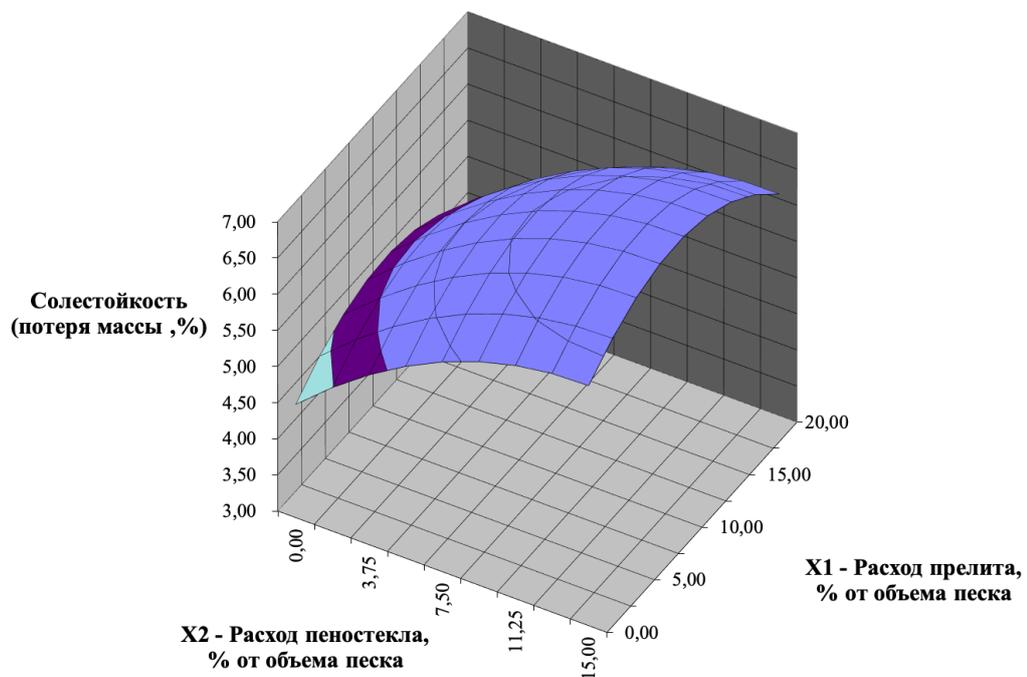


Рисунок 4.9 – Зависимость солестойкости saniрующих составов от расхода пористых заполнителей

Поскольку основная функция saniрующих покрытий заключается в аккумуляции солевых отложений оценка солестойкости производится согласно обратному эффекту, то есть чем ниже ее показатель (больше потеря массы), тем выше защитная функция штукатурки.

Полученные результаты показывают, что величина солестойкости затвердевших растворов, в которых присутствует перлитовый песок повышается от 2% до 15% по мере увеличения его содержания. Обусловлено это тем, что поры в зернах перлита малодоступны для солевых растворов вследствие их размеров, близких к тем, в которых действие капиллярных сил пренебрежимо мало. Поэтому разрушение образцов происходит менее интенсивно (рисунок 4.10). Для составов, содержащих гранулированное пеностекло, с увеличением его количества значение солестойкости снижается до 28%. Связано это с заполнением большего объема пор, формируемых в структуре saniрующего материала при введении пеностекла и доступных для накопления солевых отложений, благодаря чему разрушения проявляются сильнее. Особенно это выражено в периферийных зонах, находящихся в прямом контакте с соевыми растворами (рисунок 4.11).



Рисунок 4.10 - Образцы после испытания на солестойкость
(количество перлита - 20%)



Рисунок 4.11 - Образцы после испытания на солестойкость
(количество пеностекла - 15%)

О накоплении кристаллов солей в поровом пространстве пеностекла наглядно свидетельствует изображение структуры материала, полученное с помощью оптического микроскопа (увеличение $\times 40$). На рисунке 4.12 в гранулах заполнителя отчетливо видны соевые образования белого цвета, что подтверждает

высказанное ранее предположение о возможности поглощения и блокирования солевых растворов внутри пеностекольных зерен.

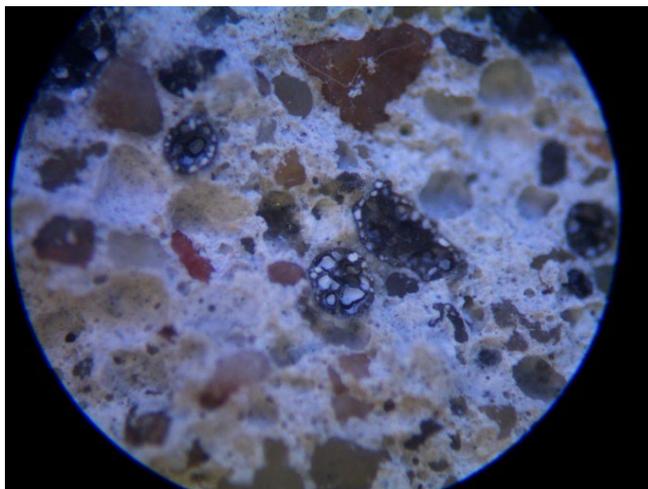


Рисунок 4.12 – Изображение структуры saniрующей штукатурки (образец после насыщения в солевом растворе и сушки)

Обобщая полученные результаты, можно сказать, что пористые заполнители позволяют модифицировать состав штукатурного раствора гарантируя получение материала, обладающего saniрующими свойствами. При этом действие перлита и пеностекла на формирование порового пространства защитного покрытия и изменение свойств, связанных с поглощением и транспортировкой водных растворов солей, будет разнонаправленным.

Перлитовый песок в большей степени способствует регулированию параметров, связанных с впитыванием и миграцией солевых растворов в структуре материала. Как следствие, обеспечиваются условия, которые улучшают выход солей из кирпичной кладки и предотвращают их движение в сторону лицевой поверхности saniрующего покрытия. Но поскольку поры в зернах перлита недоступны для проникновения водных растворов солей, штукатурные составы с применением данного вида заполнителя характеризуются низкой «солеёмкостью» и могут быть рекомендованы для нанесения на основания со слабой степенью засоленности. При этом долговечность покрытия напрямую будет определяться его толщиной.

Гранулы пеностекла, напротив, ограничивают поступление солевых растворов в структуру штукатурного слоя. В тоже время составы, содержащие пеностекло, отличаются высокими показателями «солеёмкости». Обладая поровым пространством, способным к поглощению водных растворов солей, данный вид заполнителя формирует необходимый объем сферических пустот, выступающих «резервуарами» для накопления солевых отложений. Соответственно, применение пеностекольных гранул будет эффективно только при совместном введении с перлитовым песком. Подобные составы могут применяться для устройства покрытий на кирпичных основаниях, подверженных постоянному или периодическому притоку влаги, и характеризующихся средней или высокой степенью засоленности.

4.3. Оценка эффективности защитных свойств saniрующих составов

Установленное влияние перлита и пеностекла на изменение капиллярного и поверхностного поглощений, оставляет открытым вопрос, при каком соотношении пористых заполнителей достигается оптимальное значение показателей впитываемости, обеспечивающее эффективное блокирование солей в объеме saniрующего раствора. Предполагается, что выявить такого рода зависимость, возможно путем рассмотрения структурного критерия, который отражает механизм saniрования, совместно со значениями вышеназванных параметров.

В качестве подобного критерия, описывающего механизм saniрования, предлагается рассматривать соотношение между «блокирующими» и «проводящими» порами, поскольку защитная функция штукатурных покрытий состоит в предотвращении движения солевых растворов к поверхности испарения за счет регулирования скорости капиллярного впитывания.

На основании данных ртутной порометрии цементно-известкового камня и пористых заполнителей (представлены в главе 3) произведено следующее разделение пор в фазовых частях исследуемых штукатурных растворов на «проводящие» и «блокирующие»: к «проводящим» условно относятся поры,

размер которых меньше 10^{-6} м, в то время как «блокирующими» являются поры с размерами больше 10^{-6} м.

Таблица 4.4 Характеристики пористости фазовых частей исследуемых штукатурных растворов

Фазовая часть санирующего раствора	Пористость общая, %	«Проводящие» поры, % от объема	«Блокирующие» поры, % от объема
Цементно- известковый камень	38,5*	38,5	-
Гранулированное пеностекло	88	71,8	16,2
Перлитовый песок	67	-	67

* в пересчете на цементно-известковую матрицу (без учета кварцевого песка)

В соответствии со значениями, приведенными в таблице 4.4, поры в пеностекольных гранулах делятся на «проводящие» и «блокирующие», тогда как в цементно-известковом камне присутствуют только «проводящие» поры, а в зернах перлита – только «блокирующие». Исходя из этого, для определения структурного критерия предложена формула (4.6), представляющая собой отношение объема «блокирующих» пор в зернах заполнителей к объему цементно-известкового камня:

$$n = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}}{V_{\text{цк}}}, \quad (4.6)$$

где: $V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}$ – объем «блокирующих» пор в заполнителях, м³; $V_{\text{цк}}$ – объем цементно-известкового камня, м³.

Стоит отметить, что для практических расчетов целесообразно использовать значение объема цементно-известкового камня, поскольку указанный параметр напрямую связан с объемом «проводящих» пор.

Установить объем цементно-известковой фазы возможно за счет применения формулы (4.7):

$$V_{\text{цк}} = \frac{m_{\text{ц}} + m_{\text{и}} + m_{\text{в}}}{\rho_{\text{ист.}}^{\text{цк}}}, \quad (4.7)$$

где: $m_{\text{ц}}$ – масса цемента, кг; $m_{\text{и}}$ – масса извести, кг; $m_{\text{в}}$ – масса воды, кг; $\rho_{\text{ист.}}^{\text{цк}}$ – истинная плотность цементно-известкового камня, кг/м³.

Объем, занимаемый пористыми заполнителями, определяется согласно формуле (4.8):

$$V_{\text{заполнит.}} = \frac{m_{\text{зап.}}}{\rho_3^{\text{нас.}}}, \quad (4.8)$$

где: $m_{\text{зап.}}$ – масса пористого заполнителя, кг; $\rho_3^{\text{нас.}}$ – насыпная плотность заполнителя, кг/м³.

Зная объем, занимаемый перлитом и пеностеклом, необходимо установить какая их часть приходится на «блокирующие» поры. Для этого используются коэффициенты α и β , установленные на основании результатов ртутной порометрии:

$$V_{\text{порперлита}}^{\text{блок.}} = \alpha \cdot V_{\text{перлита}}, \quad (4.9)$$

$$V_{\text{порпеностекла}}^{\text{блок.}} = \beta \cdot V_{\text{пеностекла}}, \quad (4.10)$$

где: $V_{\text{порперлита}}^{\text{блок.}}$ – объем «блокирующих» пор в перлите, м³; $V_{\text{порпеностекла}}^{\text{блок.}}$ – объем «блокирующих» пор в пеностекле, м³; α – доля «блокирующих» пор в перлите, равная 0,67; β – доля «блокирующих» пор в пеностекле, равная 0,16.

Используя приведенные формулы, получены значения структурных критериев исследуемых составов сухих saniрующих смесей. Результаты сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 Значения структурных критериев исследуемых составов сухих saniрующих смесей

№ состава	Количество пористых заполнителей, % от объема песка		$V_{\text{шк}}, \text{см}^3$	$V_{\text{пор}}^{\text{блок}}, \text{см}^3$	n
	Перлит	Пеностекло			
1	20	15	1236,1	979,1	0,79
2	20	0	1152,1	728,6	0,63
3	0	15	1118,8	125,8	0,11
4	0	0	1058,7	0,0	0,0
5	20	7,5	1191,3	849,7	0,71
6	0	7,5	1087,2	59,5	0,06
7	10	15	1172,2	514,0	0,43
8	10	0	1101,4	335,0	0,30
9	10	7,5	1134,7	416,6	0,37
10	10	7,5	1134,7	416,6	0,37
11	10	7,5	1134,7	416,6	0,37

Сопоставление численных значений структурных критериев с величинами поверхностного и капиллярного поглощений в графическом виде представлено на рисунке 4.13. Данное сопоставление позволяет установить при каком количестве пористых заполнителей достигаются наилучшие условия для блокирования солевых отложений. На горизонтальной оси представлены значения структурного коэффициента n , по вертикальной оси отложены значения капиллярного и поверхностного поглощений.



Рисунок 4.13 – Графическая зависимость между структурным критерием n , поверхностным и капиллярным поглощением

Ранее отмечалось, что эффективность механизма санирования напрямую связана с интенсивностью капиллярного поглощения внутри штукатурного покрытия: чем ниже скорость капиллярного впитывания, тем выше защитные свойства материала. При этом необходимо обеспечить переход солевых растворов из порового пространства кирпичной кладки в капилляры saniрующей штукатурки не только за счет формирования проводящей структуры, но и поверхностного поглощения. Поэтому наиболее эффективным, с точки зрения санирования, будет штукатурный раствор, который обладает высоким поверхностным поглощением при малом капиллярном поглощении. Согласно кривым, приведенным на рисунке

4.13, среди исследуемых saniрующих смесей подобными свойствами обладает состав с объемной долей перлита в заполнителе равной 20%. В данном случае значение капиллярного поглощения составляет $0,187 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}^{0,5})$, поверхностного поглощения - $0,211 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{мин}^{0,5}$, а структурный критерий n равен 0,63.

При совместном введении пористых заполнителей эффективным принят состав с объемной долей перлитового песка в заполнителе - 20%, а гранулированного пеностекла - 7,5%. Здесь величина капиллярного поглощения равна $0,181 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}^{0,5})$, поверхностного поглощения - $0,166 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{мин}^{0,5}$, значение структурного критерия - 0,71. Стоит отметить, что видимое снижение поверхностного поглощения в выбранном составе может быть функционально в случае нанесения штукатурного раствора на кирпичные основания с высокой степенью влажности и солевой нагрузки. В некоторой степени, это позволит регулировать процесс насыщения защитного покрытия солевыми растворами, увеличивая его эксплуатационный ресурс.

Эмпирическая оценка работоспособности штукатурных смесей, выбор которых произведен путем сопоставления оптимальных значений показателей впитываемости и структурных критериев, осуществлялась посредством проведения физического эксперимента, ориентированного на воспроизведение сверх экстремальных условий эксплуатации. Физическая модель представляла собой стандартный полноразмерный керамический кирпич с размерами $250 \times 120 \times 65 \text{ мм}$, на постель которого наносился штукатурный слой толщиной 30 мм (рисунок 4.14).

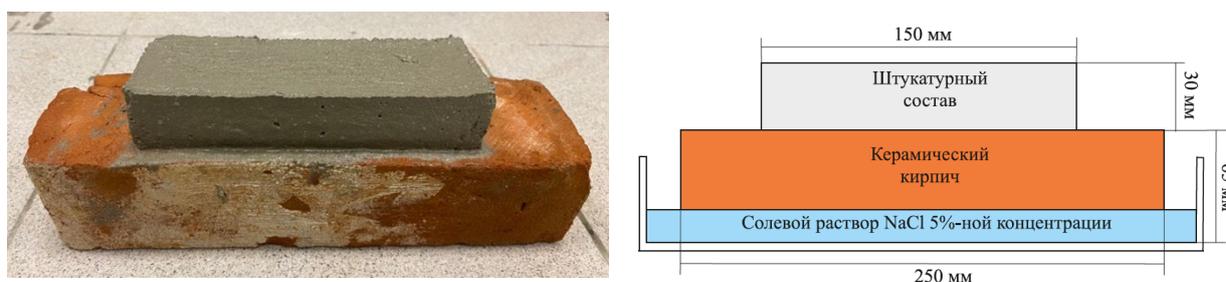


Рисунок 4.14 – Физическая модель для эмпирической оценки работоспособности saniрующей штукатурной смеси

Кирпич погружался в ванну с 5% раствором NaCl на глубину 15 мм. Для обеспечения направленной миграции солевого раствора боковые грани штукатурного слоя обрабатывались водонепроницаемым составом (расплавленный парафин). Время нахождения испытываемых образцов в солевом растворе составило 14 дней. Испытаниям подвергались базовый состав предлагаемой смеси без добавления перлита и пеностекла, обозначенный как «Контрольный» вариант, и два состава, отобранные с учетом эффективных значений критерия n , обозначенные как «Вариант 1» (количество перлита составляет 20% от объема песка) и «Вариант 2» (количество перлита - 20%, количество пеностекла - 7,5% от объема песка). Характеристики составов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Характеристики составов для эмпирической оценки защитных свойств saniрующих смесей

Расход пористого заполнителя, % от объема песка	Вариант 1	Вариант 2
	Перлит 20%	Перлит 20% Пеностекло 7,5%
Физико-механические характеристики		
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
Средняя плотность $\rho_{\text{ср.}}$, кг/м ³	2043	1969
Предел прочности при сжатии $R_{\text{сж.}}$, МПа	16,8	13,7
Солестойкость, % потери массы	4,3	6,3

Результаты испытаний устанавливались путем визуального исследования образцов и проведением рентгеноспектрального анализа с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH, оснащенного рентгеноспектральным анализатором.

В ходе визуальной оценки состояния штукатурных покрытий не выявлено наличия высолов поверхности образцов за исключением «Контрольного» варианта (рисунок 4.15, рисунок 4.16).



Рисунок 4.15 – «Контрольный» вариант, образование высолов на поверхности штукатурного покрытия после насыщения в течение 14 сут в растворе NaCl 5%-ной концентрации



Рисунок 4.16 – «Вариант 2», на поверхности штукатурного покрытия отсутствуют высолы после насыщения в течение 14 сут в растворе NaCl 5%-ной концентрации

По результатам рентгеноспектрального анализа (таблица 4.7) установлено, что для «Варианта 1» наибольшее содержание Cl в объеме материала отмечается на расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича. Полученный результат наглядно подтверждает эффективность действия перлита с точки зрения механизма санирования. Высокая впитывающая способность заполнителя улучшает поверхностное поглощение штукатурного слоя, благодаря чему солевые растворы беспрепятственно переходят в него. При этом, дальнейший капиллярный

транспорт в сторону лицевой поверхности ограничен, вследствие разности размеров пор в заполнителе и растворной матрице.

Таблица 4.7 Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

Место определения содержания Cl по сечению образца	Содержание Cl в объеме материала, %		
	Контрольный вариант (без пористых заполнителей)	Вариант 1	Вариант 2
		Перлит 20%	Перлит 20% Пеностекло 7,5%
На расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича	0,28	0,43	1,52
На расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича	0,75	1,89	0,85
На лицевой поверхности штукатурного слоя	1,32	-	-

Для «Варианта 2» локализация Cl в объеме материала наблюдается на расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича, что обусловлено введением пеностекольных гранул. Отсюда видно, что пеностекло позволяет регулировать поступление солевых растворов в капиллярную систему штукатурного слоя в случае непрерывного или попеременного притока влаги в кирпичную кладку. При этом значительная доля солевых отложений концентрируется в объеме заполнителя, что повышает «солеёмкость» защитного покрытия.

Таким образом, на основании количественной и качественной оценок эффективности защитных свойств исследуемых saniрующих составов выбраны два варианта, обладающие наилучшими характеристиками. Состав saniрующей смеси с содержанием перлитового песка равным 20% от объема песка будет эффективен при устройстве штукатурных покрытий на кирпичных основаниях степень засоленности которых отнесена к слабой или средней. Регулировать эффективность данного состава рекомендуется путем увеличения толщины наносимого покрытия с целью предотвращения выхода солевых растворов на лицевую поверхность отделки.

Состав saniрующей смеси, включающей в себя перлит и пеностекло в количестве 20% и 7,5% от объема песка рекомендован для нанесения на кирпичные основания, подверженные постоянному или периодическому увлажнению, степень засоленности которых характеризуется как высокая. Поскольку в штукатурном растворе на основе данной смеси количество пустот для свободной кристаллизации солей значительно больше, допустимо устройство покрытий толщиной около 20 мм. При этом необходимо обеспечивать замену защитного покрытия по достижении предельного насыщения солями.

4.4. Метод проектирования состава сухой saniрующей смеси с учетом свойств пористых заполнителей

Наличие объективной неоднородности свойств сырьевых компонентов при выпуске конкретной партии сухой строительной смеси, требует учета фактических характеристик применяемых материалов. В частности, при производстве saniрующих смесей колебания насыпной плотности пористых заполнителей будут оказывать влияние на формирование структуры штукатурного раствора, ухудшая эффективность блокирования солей. Поэтому для производственных целей важно определить методику, позволяющую учитывать изменчивость сырьевых материалов, обеспечивая при этом получение оптимальной структуры защитного покрытия.

На основании ранее установленных структурных критериев рациональных составов saniрующих смесей представлен расчетный метод, учитывающий изменение насыпной плотности перлитового песка и гранулированного пеностекла. Исходя из уравнений 4.6...4.10 предложены формулы, позволяющие вычислить объем пористых заполнителей, при котором достигается наилучший saniрующий эффект. Для сухой смеси на основе перлитового песка, данные выражения имеют следующий вид:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n \cdot V_{\text{цк}}, \quad (4.11)$$

$$V_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}}{\alpha}, \quad (4.12)$$

$$m_{\text{перлита}} = V_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{нас.}}, \quad (4.13)$$

где: n – структурный критерий, равный 0,63; α – доля «блокирующих» пор в перлите, равная 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:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n' \cdot V_{\text{цк}}, \quad (4.14)$$

$$V'_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \varphi}{\alpha}, \quad (4.15)$$

$$V_{\text{пеностекла}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \gamma}{\beta}, \quad (4.16)$$

$$m'_{\text{перлита}} = V'_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{нас.}}, \quad (4.17)$$

$$m_{\text{пеностекла}} = V_{\text{пеностекла}} \cdot \rho_{\text{нас.}}, \quad (4.18)$$

где: n' – структурный критерий, равный 0,71; β – доля «блокирующих» пор в пеностекле, равная 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.

Опираясь на предложенные зависимости, можно представить следующий алгоритм расчета составов сухих санирующих смесей:

- 1) Расчет расхода компонентов на тонну сухой смеси в соответствии с базовым составом;
- 2) Определение насыпной плотности кварцевого песка и пористых заполнителей, определение истинной плотности цементно-известкового камня;
- 3) Определение объема, занимаемого кварцевым песком и цементно-известковым камнем;
- 4) Определение объема блокирующих пор;
- 5) Определение объема пористых заполнителей;

б) Замещение соответствующего объема кварцевого песка пористыми заполнителями, приведение расхода компонентов к единичной массе для нормирования;

7) Корректировка состава при изменении насыпной плотности пористых заполнителей с учетом изменения соотношения в смеси заполнителей.

Выводы по четвертой главе

1) Установлено разнонаправленное действие пористых заполнителей на параметры, связанные с поглощением и транспортировкой водных растворов солей. Перлитовый песок в составе saniрующей смеси позволяет регулировать процессы впитывания и миграции солевых растворов в структуре материала, улучшая условия выхода солей из кирпичной кладки и предупреждая их появление на лицевой поверхности отделки. Гранулированное пеностекло, напротив, сдерживает поступление водных растворов солей в структуру штукатурного слоя, при этом обладая достаточной открытой пористостью формирует необходимый объем сферических пустот для накопления солевых отложений;

2) Определен структурный критерий n , представляющий собой отношение объема блокирующих пор к объему цементно-известкового камня, с помощью которого выбраны рациональные составы штукатурных смесей;

3) На основе физической модели, позволяющей воспроизвести процесс массопереноса водных растворов солей, проведена эмпирическая оценка эффективности защитных свойств saniрующих составов;

4) Предложен метод проектирования состава сухой saniрующей смеси, позволяющий установить необходимое количество пористых заполнителей, при котором обеспечиваются наилучшие условия для блокирования солей в структуре материала.

5. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СУХИХ САНИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ

В соответствии с предложенным алгоритмом (пункт 4.4 диссертации) расчета состава сухой saniрующей смеси определены рабочие рецептуры на основе результатов исследований для проведения опытно-промышленных испытаний. Характеристики сырьевых материалов, используемых на предприятии приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Сырьевые материалы, используемые на предприятии

Показатель	Значение
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	
Нормальная густота, %	28
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	52,3
Гидратная известь I сорт	
Содержание активных СаО + МgО, %	75
Насыпная плотность, кг/м ³	354
Микрокальцит КМ-100	
Остаток после просева, % на сите с сеткой номер 0,100	2,0
Насыпная плотность, кг/м ³	1005
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	
Модуль крупности	2,24
Насыпная плотность, кг/м ³	1533
Перлитовый песок М75	
Насыпная плотность, кг/м ³	80
Гранулированное пеностекло фр. 0,1-2 мм	
Насыпная плотность, кг/м ³	210

Расчет состава сухой saniрующей смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20% (для нанесения на основания с низкой солевой нагрузкой):

1) Расход компонентов на тонну сухой смеси в соответствии с базовым составом (таблица 5.2):

Таблица 5.2 Расход компонентов на тонну сухой смеси

Компонент сухой смеси	Расход, % массы смеси	Расход, кг, на тонну сухой смеси
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	16	160
Гидратная известь	1	10
Микрокальцит КМ-100	5	50
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	78	780

2) Определяем объем, занимаемый кварцевым песком и цементно-известковым камнем.

Объем песка:

$$V_{\text{песка}} = \frac{m_{\text{песка}}}{\rho_{\text{песка}}^{\text{нас.}}} = \frac{780}{1533} = 0,509\text{м}^3;$$

Объем цементно-известкового камня:

$$V_{\text{цк}} = \frac{m_{\text{ц}} + m_{\text{и}} + m_{\text{в}}}{\rho_{\text{ист.}}^{\text{цк}}} = \frac{160 + 10 + 165}{2880} = 0,116\text{м}^3.$$

где: $m_{\text{в}}$ – количество воды, равное 16,5% от массы сухих компонентов; $\rho_{\text{ист.}}^{\text{цк}}$ – истинная плотность цементно-известкового камня, равная 2880 кг/м³.

3) Определяем объем блокирующих пор:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n \cdot V_{\text{цк}} = 0,63 \cdot 0,116 = 0,073\text{м}^3$$

4) Определяем объем перлитового песка:

$$V_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}}}{\alpha} = \frac{0,073}{0,67} = 0,109\text{м}^3$$

5) Замещаем соответствующий объем кварцевого песка пористым заполнителем:

$$V_{\text{песка}}^{\text{кор.}} = V_{\text{песка}} - V_{\text{перлита}} = 0,509 - 0,109 = 0,400\text{м}^3$$

Определяем расход кварцевого песка и перлита:

$$m_{\text{песка}} = V_{\text{песка}}^{\text{кор.}} \cdot \rho_{\text{песка}}^{\text{нас.}} = 0,400 \cdot 1533 = 613\text{кг};$$

$$m_{\text{перлита}} = V_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{перлита}}^{\text{нас.}} = 0,109 \cdot 80 = 9\text{кг}$$

Таблица 5.3 Расход компонентов после замещения соответствующего объема кварцевого песка пористым заполнителем

Компонент сухой смеси	Расход, кг
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	160
Гидратная известь	10
Микрокальцит КМ-100	50
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	613
Перлитовый песок М75	9

Исходя из количества заполнителей приводим расход компонентов в смеси к единичной массе для нормирования:

Таблица 5.4 Расход компонентов на тонну сухой смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20%

Компонент сухой смеси	Расход, кг, на тонну сухой смеси
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	190
Гидратная известь	12
Микрокальцит КМ-100	60
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	728
Перлитовый песок М75	11

Расчет состава сухой санирующей смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20% и гранулированного пеностекла 7,5% (для нанесения на основания со средней или высокой солевой нагрузкой):

1) Расход компонентов на тонну сухой смеси соответствует данным, приведенным в таблице 5.2.

2) Объем, занимаемый кварцевым песком – $V_{\text{песка}} = 0,509 \text{ м}^3$;

Объем, занимаемый цементно-известковым камнем - $V_{\text{цк}} = 0,116 \text{ м}^3$

3) Определяем объем блокирующих пор:

$$V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} = n' \cdot V_{\text{цк}} = 0,71 \cdot 0,116 = 0,083 \text{ м}^3$$

4) Определяем объем, занимаемый пористыми заполнителями:

- Объем перлитового песка:

$$V'_{\text{перлита}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \varphi}{\alpha} = \frac{0,083 \cdot 0,917}{0,67} = 0,114 \text{ м}^3$$

- Объем гранулированного пеностекла:

$$V_{\text{пеностекла}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{блок.}} \cdot \gamma}{\beta} = \frac{0,083 \cdot 0,083}{0,16} = 0,043 \text{ м}^3$$

5) Замещаем соответствующий объем кварцевого песка пористыми заполнителями:

$$V_{\text{песка}}^{\text{кор.}} = V_{\text{песка}} - V_{\text{перлита}} - V_{\text{пеностекла}} = 0,509 - 0,114 - 0,043 = 0,352 \text{ м}^3$$

Определяем расход кварцевого песка, перлита и гранулированного пеностекла:

$$m_{\text{песка}} = V_{\text{песка}}^{\text{кор.}} \cdot \rho_{\text{песка}}^{\text{нас.}} = 0,352 \cdot 1533 = 540 \text{ кг};$$

$$m_{\text{перлита}} = V_{\text{перлита}} \cdot \rho_{\text{перлита}}^{\text{нас.}} = 0,114 \cdot 80 = 9 \text{ кг};$$

$$m_{\text{пеностекла}} = V_{\text{пеностекла}} \cdot \rho_{\text{пеностекла}}^{\text{нас.}} = 0,043 \cdot 210 = 9 \text{ кг}$$

Таблица 5.5 Расход компонентов после замещения соответствующего объема кварцевого песка пористым заполнителем

Компонент сухой смеси	Расход, кг
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	160
Гидратная известь	10
Микрокальцит КМ-100	50
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	540
Перлитовый песок М75	9
Гранулированное пеностекло фр. 0,1-2 мм	9

Исходя из количества заполнителей приводим расход компонентов в смеси к единичной массе для нормирования:

Таблица 5.6 Расход компонентов на тонну сухой смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20% и гранулированного пеностекла 7,5%

Компонент сухой смеси	Расход, кг, на тонну сухой смеси
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	206
Гидратная известь	13
Микрокальцит КМ-100	64
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	694
Перлитовый песок М75	12
Гранулированное пеностекло фр. 0,1-2 мм	12

5.1. Оценка технико-экономической эффективности разработанных сухих saniрующих смесей

На основании данных, полученных в результате расчета рабочих рецептур, вычислена стоимость производства 1 тонны сухой saniрующей смеси для каждого рассматриваемого состава (таблица 5.7).

Состав сухой смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20%, предназначенный для нанесения на основания с низкой солевой нагрузкой обозначен как «Смесь 1». Состав сухой смеси с долей перлитового песка в заполнителе 20% и гранулированного пеностекла 7,5%, предназначенный для нанесения на основания со средней или высокой солевой нагрузкой обозначен как «Смесь 2».

Таблица 5.7 Расход и стоимость компонентов для изготовления 1 тонны сухих saniрующих смесей

Компонент	Стоимость с НДС, руб/кг (на 06.2024)	Стоимость в составе, руб.	
		«Смесь 1»	«Смесь 2»
Портландцемент	10	$190 \cdot 10 = 1900,0$	$206 \cdot 10 = 2060$

Гидратная известь	9,43	12·9,43=113,16	13·9,43=122,59
Микрокальцит КМ-100	10,33	60·10,33=619,80	66·10,33=661,12
Песок строительный фр. 0-2,5 мм	2	728·2=1456	694·2=1388
Перлитовый песок М75	104,65	11·104,65=1151,15	12·104,65=1255,8
Гранулированное пеностекло фр. 0,1-2 мм	124,63	-	12·124,63=1495,56
Накладные расходы с учетом прибыли в 20%		13100,28	17457,68
Упаковка		40·26,69=1067,60	40·26,69=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

Ориентировочный расход сухих смесей для устройства 1м² штукатурного покрытия при средней толщине отделочного слоя 20 мм составляет 34,7 кг для состава с долей перлитового песка в заполнителе 20% и 32,9 кг для состава с долей перлита и пеностекла в заполнителе 20% и 7,5%. Согласно данным, приведенным в таблице 5.7, стоимость 1м² защитного покрытия для нанесения на основание с низкой степенью засоленности составит 719,62 рублей, а для оснований со средней или высокой солевой нагрузкой – 883,00 рубля.

Себестоимость разработанных составов сухих saniрующих смесей существенно ниже по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами, предполагающими устройство многослойных покрытий. Основываясь на рыночной стоимости, взятой из открытых источников, установлено, что для оснований с низкой степенью засоленности экономический эффект от применения «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. Дополнительно стоит отметить, что устройство многослойных систем требует больше временных и трудовых ресурсов, которые также будут влиять на конечные затраты при производстве работ.

5.2. Опытно-промышленные испытания сухих saniрующих смесей

Разработанный состав сухой saniрующей смеси, предназначенный для устройства штукатурных покрытий на основаниях с высокой или средней степенью засоленности, был использован при проведении реставрационных работ фасадов Усадьбы И.Г. Чернышева «Александрино» (Санкт-Петербург, проспект Стачек, 226), являющейся объектом культурного наследия федерального значения.

По результатам обследования было установлено, что фасады здания гладко оштукатурены и окрашены, находятся в неудовлетворительном состоянии. На фасадах имелись трещины, следы протечек, наблюдались участки разрушения и утраты штукатурного слоя (рисунок 5.1), местами была оголена кирпичная кладка, отмечались следы замокания и высолы (рисунок 5.2).



Рисунок 5.1 – Участки разрушения и утраты штукатурного слоя на фасадах Усадьбы И.Г. Чернышева «Александрино»

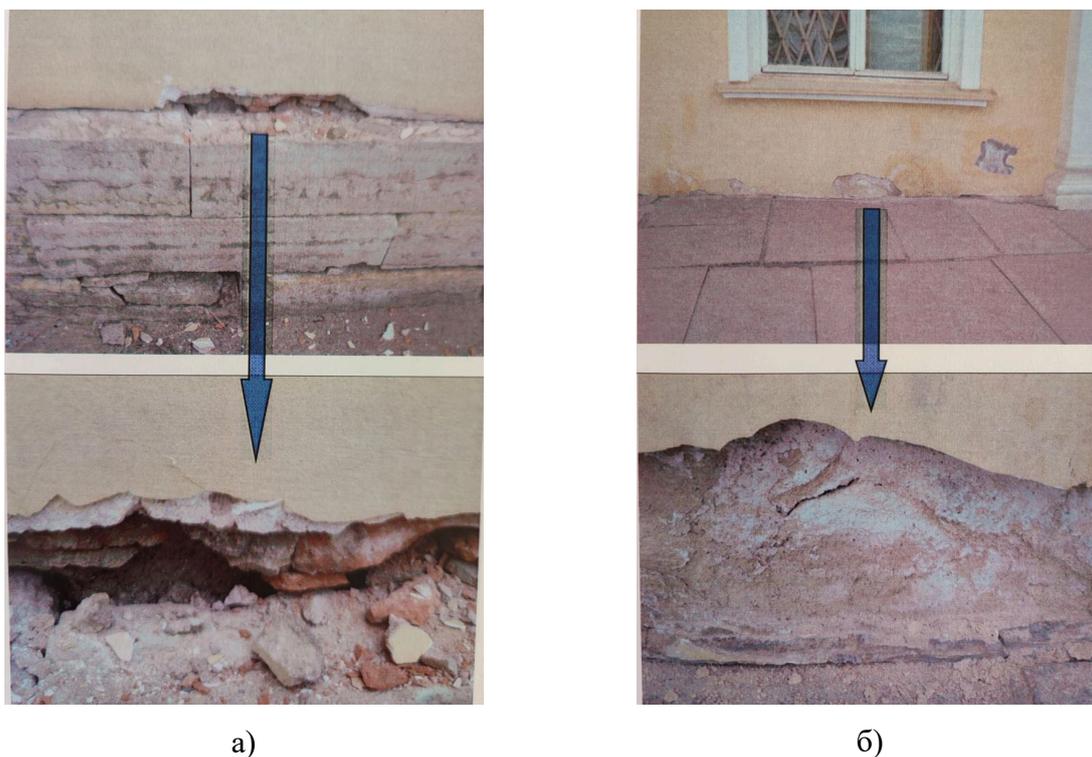


Рисунок 5.2 – Состояние фасадов на момент обследования объекта:
а) оголение кирпичной кладки, деструкция кирпича; б) повышенная влажность, кристаллизация солей на поверхности штукатурного раствора

На основании проведенных исследований в рамках проекта реставрации было предусмотрено нанесение над цокольной облицовкой пояса из saniрующей штукатурки высотой 1 м (рисунок 5.3). Средняя толщина слоя штукатурного покрытия составляла 20 мм. Для придания поверхности фасада декоративных свойств дополнительно осуществлялась окраска saniрующего слоя силикатной краской, обладающей необходимыми параметрами по паропроницаемости. Реставрационные работы проводились в 2023 г.

Осмотр фасадов в 2024 г. показал отсутствие на поверхности отделочного слоя трещин, солевых отложений, мокрых пятен и прочих дефектов, которые бы свидетельствовали о протекании солевой коррозии в кирпичной кладке (рисунок 5.4). Полученный результат позволяет судить об эффективности разработанного состава сухой saniрующей смеси в отношении блокирования солевых отложений.



Рисунок 5.3 – Устройство санитарного покрытия над цокольной облицовкой (2023 г.)



Рисунок 5.4 – Состояние фасада после реставрационных работ
(июнь 2024 г.)

Выводы по пятой главе

1) С использованием предложенного в диссертации метода расчета состава сухой saniрующей смеси определены рабочие рецептуры на основании которых установлено, что стоимость 1 упаковки (25 кг) saniрующей смеси для нанесения на основания с низкой солевой нагрузкой составляет 518,46 руб., а для оснований с высокой или средней солевой нагрузкой – 670,97 руб.

2) При однослойном нанесении штукатурных покрытий, изготовленных с применением разработанных saniрующих смесей экономический эффект выражается в снижении стоимости производства работ. Для оснований с низкой степенью засоленности сокращение затрат при устройстве 1 м² штукатурного слоя толщиной 20 мм выше в 2,3 раза по сравнению с отечественным аналогом, предполагающим многослойное нанесение, и в 9,3 раз по сравнению с зарубежным при однослойном нанесении. Для оснований с высокой или средней степенью солевой нагрузки при нанесении однослойного покрытия в сравнении с многослойными отечественными и зарубежными системами стоимость работ снижается в 1,9 и 17,2 раза соответственно.

3) Использование разработанной сухой saniрующей смеси (рекомендуемой для нанесения на кирпичные основания с высокой или средней солевой нагрузкой) при проведении реставрационных работ, позволило получить штукатурное покрытие, в процессе эксплуатации которого отсутствуют видимые повреждения, что подтверждает его эффективность в отношении блокирования солевых отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность сухих saniрующих смесей на основе смешанного цементно-известкового вяжущего с добавлением пористых минеральных заполнителей для устройства однослойных штукатурных покрытий, защищающих кирпичную кладку от солевой коррозии:

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 saniрующего 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 saniрующей 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 saniрующих 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 saniрующего

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 saniрующих смесей, основанный на использовании структурного критерия n , характеризующего соотношение условно-замкнутой и капиллярной пористости в штукатурном saniрующем 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 saniрующих смесей, способных предотвратить образование высолов на поверхности штукатурного покрытия при однослойном нанесении на засоленные кирпичные кладки. Подтверждена эффективность saniрующего состава в рамках проведения реставрационных работ.

Перспективы дальнейших исследований:

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2021 г. №2425 «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подлежащей декларированию соответствия, внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. №2467 и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rst.gov.ru:8443/file-service/file/load/1643289262448>
2. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 января 2020 г. №2-ст «О приостановлении действия национальных стандартов РФ» - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet.garant.ru/#%2Fdocument%2F73674395%2Fparagraph%2F1%2Fdoclist%2F96%2Fshowentries%2F0%2Fhighlight%2FГОСТ%20Р%2057336-2016%7CEN%20998-1%3A2010%3A2>
3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 [Текст]. введ.01.07.2013. – Москва, 2012. – 96 с.
4. *Альперович, И.А.* Способы предотвращения высолов на глиняном кирпиче: Обзор / И.А. Альперович, В.Н. Бурмистров. – М.: ВНИИЭСМ, 1977. – 56 с.
5. *Бабков, В.В.* Процессы высолообразования на поверхностях наружных стен зданий на основе штучных стеновых материалов / В.В. Бабков, А.И. Габитов, В.П. Климов, А.Е. Чуйкин, А.А. Ортаовская, Л.Р. Равилова // Башкирский химический журнал. – 2007. – Том 14. №3. – С. 86-90.
6. *Бабков, В.В.* Цикличность высолообразования на поверхности наружных стен зданий из штучных материалов / В.В. Бабков, А.В. Мохов, А.И. Габитов, А.Е. Чуйкин // Строительные материалы. – 2010. – №1. – С. 56-57.
7. *Белановская, Е.В.* Защита кирпичной кладки памятников архитектуры от коррозии / Е.В. Белановская // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – №1. – Т.2. – С. 7-9.

8. *Белых, С.А.* Оценка основного эффекта действия санирующей штукатурки / С.А. Белых, А.А. Чикичев // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2014 – Т.1.– С. 94-98.
9. *Белых, С.А.* Сухая строительная смесь с повышенной адгезионной прочностью для отделки кирпичных поверхностей во влажных помещениях / С.А. Белых, А.И. Кудяков, А.А. Чикичев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – №1 (60). – С. 122-133.
10. *Берестяный, А.Л.* Система реставрационных штукатурок Siltec / А.Л. Берестяный // Сухие строительные смеси. – 2012. – №1. – С. 22-23.
11. *Бессонов, И.В.* Причины появления и способы устранения высолов на кирпичных стенах зданий / И.В. Бессонов, В.С. Баранов, В.В. Баранов, В.П. Князева, Т.Ф. Ельчищева // Жилищное строительство. – 2014. – №7. – С. 39-43.
12. *Ваккасов, Х.С.* Высолы на кирпичной кладке: причины их образования и методы устранения / Х.С. Ваккасов, Ж.Б. Эшонжонов // Вестник науки и творчества. – 2017. – №2 (14). – С. 21-24.
13. *Васильков, С.Г.* Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе: справочное пособие / С.Г. Васильков, С.П. Онацкий, М.П. Элинзон и др. – М: Стройиздат, 1987. – 304 с.
14. *Витрувий* Десять книг об архитектуре / Витрувий. Репринтное издание. – М.: «Архитектура-С», 2017. – 328 с.
15. *Волков, А.И.* Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск.: Современная школа, 2005. – 608 с.
16. *Гагарин, В.Г.* Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.03 / В.Г. Гагарин. – Москва, 2000. – 396 с.
17. *Горлов, Ю.П.* Технология теплоизоляционных материалов: учебник для вузов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
18. *Григорьев, Д.С.* Исследование влияния способов формирования порового пространства на свойства санирующей штукатурки / Д.С. Григорьев // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 3 (62). – С. 139–145.

19. *Григорьев, Д.С.* Структурное регулирование капиллярной проводимости saniрующих штукатурок / Д.С. Григорьев // *Фундаментальные исследования* – 2017. – №9. – С. 42-47.
20. *Грунау, Э.Б.* Предупреждение дефектов в строительных конструкциях: Пер. с нем Ю.М. Веллера / Э.Б. Грунау. – М.: Стройиздат, 1980. – 215 с.
21. *Дамдинова, Д.Р.* Пеностекло на основе стеклобоя и высококристаллических горных пород / Д.Р. Дамдинова, М.М. Зонхийев, Р.Р. Бешпле // *Научное обозрение*. – 2015. – № 8. – С. 191-197.
22. *Демидович, Б.К.* Пеностекло / Б.К. Демидович. – Минск.: Наука и техника, 1975. – 248 с.
23. *Денискина, Е.В.* Процессы разрушения подземной кирпичной кладки зданий городскими загрязненными водами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 11.00.11/ Е. В. Денискина; МГСУ. – Москва., 2000. – 24 с.
24. *Дергунов, С.А.* Сухие строительные смеси (состав, технология, свойства): учебное пособие / С.А. Дергунов, С.А. Орехов. – Оренбург.: ОГУ, 2012. – 106 с.
25. *Езерский, В.А.* Прогнозирование сорбционной влажности кирпичной кладки, содержащей смеси солей / В.А. Езерский, Н.В.Кузнецова // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2002. – №9 (44). С. 12-13.
26. *Закоршменный, А.И.* Сравнение результатов водонепроницаемости бетона подземных сооружений в натуральных условиях, получаемых с использованием прямых и косвенных методов испытаний / А.И. Закоршменный // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2007. – №4. – С. 282-294.
27. *Зозуля, П.В.* Общая характеристика свойств сухих строительных смесей и их оценка / П.В. Зозуля // II межд. конф. Baltimix «Сухие строительные смеси для XXI века: технологии и бизнес». Сборник тезисов. – 2002. – С. 6-8.
28. *Инчик, В.В.* Высолы и солевая коррозия кирпичных стен / В. В. Инчик. СПб.: СПбГАСУ, 1998. – 324 с.
29. *Инчик, В.В.* Капиллярный подсос стенового керамического материала в зависимости от поровой структуры кирпича / В.В. Инчик, А.А. Царенко // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 1 (84). – С. 103-108.

30. *Инчик, В.В.* Микробная деструкция и солевая коррозия кирпичной кладки / В.В. Инчик // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 86-92.
31. *Инчик, В.В.* Опыт обследования состояния кирпичных стен зданий, сооружений и памятников архитектуры, подвергшихся солевой коррозии / В.В. Инчик // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2001. №1 (4). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://georeconstruction.net/journals/04/09/09.htm>
32. *Инчик, В.В.* Солевая коррозия кирпичной кладки / В.В. Инчик // строительные материалы. – 2000. – № 8. – С. 35-37.
33. *Инчик, В.В.* Эрозия и коррозия кирпичной кладки / В.В. Инчик // Вестник гражданских инженеров. – 2004. – № 1. – С. 92-98.
34. *Ицкович, С.М.* Технология заполнителей бетона / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. – М.: Высшая школа, 2001. – 272 с.
35. *Кетов, А.А.* Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя / А.А. Кетов, И.С. Пузанов, Д.В. Саулин // Строительные материалы. – 2007. – №3. – С. 70-72.
36. *Кетов, А.А.* Тенденции развития технологии пеностекла / А.А. Кетов, А.В. Конев, Д.В. Саулин // Строительные материалы. – 2007. – №9. – С. 28-31.
37. *Климов, В.П.* Механизмы высолообразования на поверхностях наружных стен зданий на основе штучных стеновых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В. П. Климов; УГНТУ. – Уфа., 2007. – 23 с.
38. *Коган, В.Б.* Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В.Б. Коган. – Л.: «Химия», 1977. – 592 с.
39. *Козлов, В.В.* Сухие строительные смеси: учебное пособие / В.В. Козлов. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.
40. *Комкова, А.В.* Пеностекло и его применение в России [Электронный ресурс] / А.В. Комкова, М.П. Рачинская // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 5. – Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2012/05/12937>

41. *Корнеев, В.И.* Рецептурный справочник по сухим строительным смесям / В.И. Корнеев, П.В. Зозуля, И.Н. Медведева, Г.А. Богоявленская, Н.И. Нуждина – СПб.: ООО «Квинтет», 2021. – 302 с.
42. *Корнеев, В.П.* Сухие строительные смеси (состав, свойства): учебное пособие / В.П. Корнеев, П.В. Зозуля. – М.: Машиностроительная компания «Вселуг», 2010. – 318 с.
43. *Красовский, П.С.* Физико-химические основы формирования структур цементных бетонов: учеб. пособие / П.С. Красовский. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – 204 с.
44. *Леденев, В.И.* Физико-технические основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий: учебное пособие / В.И. Леденев, И.В. Матвеева. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2005. – 160 с.
45. *Лыков, А.В.* Теория Сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
46. *Лыков, А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат. 1956. – 464 с.
47. *Лыков, А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1954. – 298 с.
48. *Мизюряев, С.А.* Структура теплоизоляционных материалов / С.А. Мизюряев // Материалы 66-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2008 г. «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика». СГАСУ. –2009. – С. 205-206.
49. *Минас, А.И.* Солевая форма физической коррозии строительных материалов и методы борьбы с ней: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук:05.00.00 / А.И. Минас; Акад. строительства и архитектуры СССР, Казах.филиал. – Алма-Ата., 1961. – 37 с.
50. *Москвин, В.И.* Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.И. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

51. *Мохов, А.В.* Цикличность и способы блокировки процессов высолообразования на поверхностях наружных стен зданий на основе вибропресованных бетонных блоков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.В. Мохов; УГНТУ. – Уфа., 2010. – 23 с.

52. *Наумов, А.А.* Устранение высолов на керамическом кирпиче / А.А. Наумов // Строительные материалы. – 2016. – №5. – С. 37-39.

53. *Неймарк, И.Е.* Поры в твердых телах и их значение в технологических процессах / И.Е. Неймарк. – М.: Знание, 1984. – 64 с.

54. *Никонов, А.С.* Разработка теплоизоляционного материала с высокими эксплуатационными свойствами из отходов листового стекла: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05/ А.С. Никонов. – Владимир, 2017 – 115 с.

55. *Онацкий, С.П.* Керамзитовый гравий. Исследование глин и опыт получения керамзита / С.П. Онацкий. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 80 с.

56. *Плаченков, Т.Г.* Порометрия / Т.Г. Плаченков, С.Д. Колосенцев. – Л.: Химия, 1988. – 176 с.

57. *Подъяпольский, С.С.* Реставрация памятников архитектуры: учеб. Пособие для вузов / С.С. Подъяпольский, Г.Б. Бессонов, Л.А. Беляев, Т.М. Постникова. – М.: Стройиздат, 1988. – 264 с.

58. *Попов, М.Ю.* Щелоче-силикатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла / М.Ю. Попов, Б.Г. Ким, В.Е. Ваганов, А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2015. – №4. – С. 89-93.

59. *Пучков, Ю.М.* Повышение эксплуатационных качеств каменных зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rusnauka.com/21_SEN_2014/Stroitelstvo/3_175269.doc.htm

60. *Пучков, Ю.М.* Процессы в засоленных каменных конструкциях / Ю.М. Пучков // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – №3 (16). – С. 237-243.

61. *Роговой, М.И.* Технология искусственных пористых заполнителей и керамики / М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1974. – 315 с.

62. *Ройль, Х.* Руководство по защите и санированию строительных сооружений: причины повреждений, методы диагностики, возможности санирования / Хорст Ройль. – СПб.: РИА «Квинтет», 2013. – 372 с.

63. *Росс, Х.* Штукатурка. Практическое руководство: материалы, техника производства работ, предотвращение дефектов / Хартмут Росс, Фридеманн Шталь. – СПб.: РИА «Квинтет», 2006. – 274 с.

64. *Саулин, Д.В.* Исследование щелочесиликатного взаимодействия пеностеклянных наполнителей с цементным вяжущим / Д.В. Саулин, А.В. Рожкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2017. – №1. – С. 89-105.

65. *Семейных, Н.С.* Анализ использования различных сырьевых компонентов в производстве гранулированного пеностекла / Н.С. Семейных, Г.В. Сопегин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 60–74.

66. *Серов, А.Д.* Моделирование опасных процессов (увлажнения и засоления) подземной части здания / А.Д. Серов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. – №2 (22). – С. 105-113.

67. *Сопегин, Г.В.* Анализ существующих технологических решений производства пеностекла / Г.В. Сопегин, Д.Ч. Рустамова, С.М. Федосеев // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – Вып. 12. – С. 1584–1609.

68. *Старцев, С.А.* Анализ причин неблагоприятного состояния подвалов в Санкт-Петербурге / С.А. Старцев // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №2. – С. 31-42.

69. *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.

70. *Степанова, В.Ф.* Причины образования высолов на поверхности строительных конструкций / В.Ф. Степанова, Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний // Строительные материалы. – 2000. – №3. – С. 30-31.

71. Сухие строительные смеси: Справочник / под ред. Т.И. Петрова – М.: Стройинформ, 2007. – 828 с.

72. *Терновой, В.И.* Исследование влияния компонентного состава на формирование эксплуатационных показателей отечественной санирующей штукатурки / В.И. Терновой, И.М. Уманец, Н.Р. Антонюк, Р.Б. Гуцуляк // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры – 2010. – №38. – С. 610-614.

73. *Терновой, В.И.* Исследование влияния технологии нанесения разработанной санирующей штукатурки на формирование ее физико-механических показателей / В.И. Терновой, И.М. Уманец // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2010. – №3 (83). – С. 65-70.

74. *Терновой, В.И.* Исследование эксплуатационных показателей отечественной санирующей штукатурки / В.И. Терновой, Р.Б. Гуцуляк, И.М. Уманец, Н.Р. Антонюк // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры – 2009. – №34. – С. 490-494.

75. *Тихонов, Ю.М.* Разработка рецептуры легких сухих растворных смесей (ЛСРС) на основе вспученного перлита и вермикулита [Электронный ресурс] / Ю.М. Тихонов, В.И. Коломиец, М.С. Городецкий // II межд. конф. Baltimix «Сухие строительные смеси для XXI века: технологии и бизнес» – 2002. – Режим доступа: https://baltimix.ru/confer_archive/reports/doclad02/Tixonov.php

76. *Улыбин, А.В.* Контроль влажности при обследовании каменных конструкций / А.В. Улыбин, С.А. Старцев, С.В. Зубков // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №7. – С. 32-39.

77. *Уманец, И.М.* Исследование параметров технологического процесса устройства санирующей известково-перлитовой штукатурки / И.М. Уманец // Управление развитием сложных систем – 2014. – №17. – С. 180-186.

78. *Урецкая, Е.А.* Ремонт влажных и поврежденных солями строительных конструкций / Е.А. Урецкая, Е.М. Плотникова // Сухие строительные смеси. – 2011. – №1. – С. 32-35.

79. *Устинова, Ю.В.* Солевая коррозия строительных конструкций / Ю.В. Устинова, Т.П. Никифорова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2014. – №2 (33). – С.14.

80. *Фасеева, Г.Р.* Структура пор и сравнительные характеристики кирпича / Г.Р. Фасеева, А.М. Салахов, А.И. Хацринов // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – №8. – С. 220-230.

81. *Федосов, С.В.* Пеностекло: особенности производства, моделирование процессов теплопереноса и газообразования / С.В. Федосов, М.О. Баканов // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С. 108-113.

82. *Фокин, К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К.Ф. Фокин – М.: Изд-во Стройиздат, 1973. – 287 с.

83. *Фрессель, Ф.* Ремонт влажных и поврежденных солями строительных сооружений / Франк Фрессель. – М.: ООО «Пэйнт-Медиа», 2006. – 320 с.

84. *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.

85. *Харитонов, А.М.* Развитие методов оптимизации составов многокомпонентных строительных композитов / А.М. Харитонов // Фундаментальные исследования. – 2015. – №11. – С. 520-523.

86. *Харитонов, А.М.* Штукатурные системы для комплексной защиты засоленных кладок / А.М. Харитонов, Ю.А. Беленцов, Ю.М. Тихонов // Тез. докл. междунар. науч. конф. «Современные материалы и передовые производственные технологии». – СПб.: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – 2019. – С. 41-42.

87. *Харитонов, А.М.* Штукатурный состав для комплексной защиты кирпичных стен от солевой коррозии / А.М. Харитонов, В.А. Николаев // Инновации и инвестиции. – 2019. – №3. – С. 230-234.

88. *Хейфец, Л.И.* Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк – Москва.: «ХИМИЯ», 1982. – 319 с.
89. *Чураев, Н.В.* Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. – М.: Химия, 1990. – 272 с.
90. *Шиббаев, С.Ю.* Применение систем saniрующих штукатурок для санации каменной кладки / С.Ю. Шиббаев // Реставрационный вестник. – 2023. – №2. – С.3-10.
91. *Штарк, И.* Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2004. – 301 с.
92. *Штарк, И.* Цемент и известь / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2008. – 469 с.
93. *Эпштейн, А.С.* Механизм движения влаги в некоторых строительных материалах при перепаде температур (научное сообщение) / А.С. Эпштейн – Киев, 1953. – 16 с.
94. *Яковлева, М.Я.* Защита строительных сооружений от водно-солевых нагрузок / М.Я. Яковлева // Сухие строительные смеси. – 2015. – №4. – С.28-31.
95. *Alaa, M.R.* A synopsis about perlite as building material – a best practice guide for Civil Engineer / R. M. Alaa // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol.121. – P.338-353.
96. *Auras, M.* Poultrices and mortars for salt contaminated masonry and stone objects / M. Auras // SWBSS. – 2008. – P. 197-217. – Режим доступа: https://www.academia.edu/10729848/Poultrices_and_mortars_for_salt_contaminated_masonry_and_stone_objects
97. *Blaeuer, C.* Salt crystal intergrowth in efflorescence on historic buildings / C. Blaeuer, A. Kueng, K. Zehnder // CHIMIA International Journal for Chemistry. – 2001. – Vol. 55(11). – P.996-1001. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/233688672_Salt_Crystal_Intergrowth_in_Efflorescence_on_Historic_Buildings
98. *Bochen, J.* Experimental study on salt crystallization in plasters subjected to simulate groundwater capillary rise / J. Bochen, B. Słomka-Słupik, J.Ślusarek //

Construction and building materials. – 2021. – Vol.308 (1). – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821027847?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8a8c44fe192f8db9

99. *Bracciale, M. P.* Molecular crystallization inhibitors for salt damage control in porous materials: an overview / M. P. Bracciale, S. Sammut, J. Cassar, M. L. Santarelli, A. Marrocchi // *Molecules*. – 2020. – 25(8):1873. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/molecules25081873>

100. *Brito, V.* Dry kinetics of porous stones in the presence of NaCl and NaNO₃: experimental assessment of the factors affecting liquid and vapour transport / V. Brito, T. Goncalves // *Transport in porous media*. – 2013. – Vol.100 (2). – P.193-210. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-013-0211-5>

101. *Chaib, O.* Mechanical behavior and durability of perlite based mortar exposed to sodium sulfate attack / O. Chaib, O. Safer, F. Dif // *Materials science (Medžiagotyra)*. – 2024. – Vol.30. – P.378-387.

102. *Charola, E.* Salts in masonry: an overview of the problem / E. Charola, C. Blaeuer // *Restoration of buildings and monuments*. – 2015. – Vol. 21 (4-6) – P. 119-135.

103. *Charola, E.* Salts in the Deterioration of Porous Materials: An overview / E. Charola // *Journal of the American Institute for conservation*. – 2000. – Vol. 39 (3) – P. 327-343.

104. *Claudio, T.* Salt crystallization in plastered or rendered walls / T. Claudio, D. Gonsalves // *Lisbon: Universidade Tecnica De Lisboa*. 2007. – 245 p.

105. *Dif, F.* Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments / F. Dif, M. Mouli // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol.179. – P.25-34.

106. *Delgado, J. M. P. Q.* Salt damage and rising treatment in building structures / J. M. P. Q. Delgado, A. S. Guimaraes, V. P. de Freitas, I. Antepara, V. Koči, R. Černý // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol.1. – P.1-13 – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2016/1280894>

107. EWAGLOS: Европейский иллюстрированный словарь терминов охраны и восстановления монументальной живописи и архитектурных поверхностей.

Русские переводы английских дефиниций с соответствиями на арабском, болгарском, венгерском, испанском, итальянском, немецком, персидском, польском, румынском, турецком, французском, хорватском и японском языках / под ред. Ю.А. Грибер; науч. ред. А. Вайер, П. Роиг Пиказо, Д. Поп, Дж. Кассар, А. Оскёзе, Ж.-М. Валле, И. Срша. – М.: Издательство «Согласие», 2020. – 268 с.

108. *Fragata, A.* “Ventilated render” system: a replacement render for historic construction / A. Fragata, M.R. Veiga, A.L. Velosa // НМС13 – 3rd Historic Mortars Conference. – 2013. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/258227222_Ventilated_render_system_a_replacement_render_for_historic_construction

109. *Fragata, A.* Substitution ventilated render systems for historic masonry: salt crystallization tests evaluation / A. Fragata, M. Viega, A. Velosa // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 102, part 1. – P.592-600. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/283855386_Substitution_ventilated_render_systems_for_historic_masonry_Salt_crystallization_tests_evaluation

110. *Granneman, Sanne J.C.* Characterization of lime mortar additivated with crystallization modifiers / Sanne J.C. Granneman, B. Lubelli, R.P.J. Van Hees // International Journal of Architectural Heritage. – 2018. – Vol. 12. – P. 849-858.

111. *Ibraeva, Y.* Salt corrosion of brick walls [Электронный ресурс] / Y. Ibraeva, P. Tarasevskii, A. Zhuravlev // МАТЕС Web of Conferences 106, 03003 (2017), SPbWOSCE – 2016. – Режим доступа: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/20/matecconf_spbw2017_03003.pdf

112. *Karaglou, M.* Effect of coatings on moisture and salt transfer phenomena of plasters / M. Karaglou, A. Bakolas, A. Moropoulou, A. Papapostolou // Construction and building materials. – 2013. – Vol.48. – P.35-44.

113. *Mancigotti, S.* Salt crystallization in pores: the effect of crystal growth rate on damage / S. Mancigotti, A. Hamilton // WIT Transactions on the Built Environment. – 2017. – Vol.171. – P.207-214. – Режим доступа: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/171/36091>

114. *Massari, G.* Damp buildings, Old and New / G. Massari, I. Massari // ICCROM, 1993. – Architecture – 305 p.

115. *Petković, J.* Moisture and salt transport in three-layer plaster/substrate systems / J. Petković, H. Huinink, L. Pel, K. Kopinga, R.P.J. Van Hees // Construction and building materials. – 2010. – Vol.24 (1) – P.118-127.

116. *Price, C.A.* Stone conservation: an overview of current research / C.A. Price. – Santa Monica, CA: J. Paul Getty trust, 1996. – p. 73.

117. *Shangina, N.* Dry mixes for the restoration: basic principles of design / N. Shangina, Y. Pukhareno, A. Kharitonov, T. Kharitonova // International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City». – 2017. – Vol. 106 (2017). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710603021>.

118. *Straube, J.F.* Moisture in buildings / J.F. Straube // ASHRAE Journal. –2002. – Vol. 44(1). – P. 15-19.

119. *Viega, M.* Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings / M. Viega, A. Fragata, A. Velosa, A. Magalhaes // International Journal of Architectural Heritage. – 2010. – Vol. 4(2). – P.177-195.

120. WTA-Merkblatt 2-2-91 Sanierputzsysteme, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege WTA e.V., München.

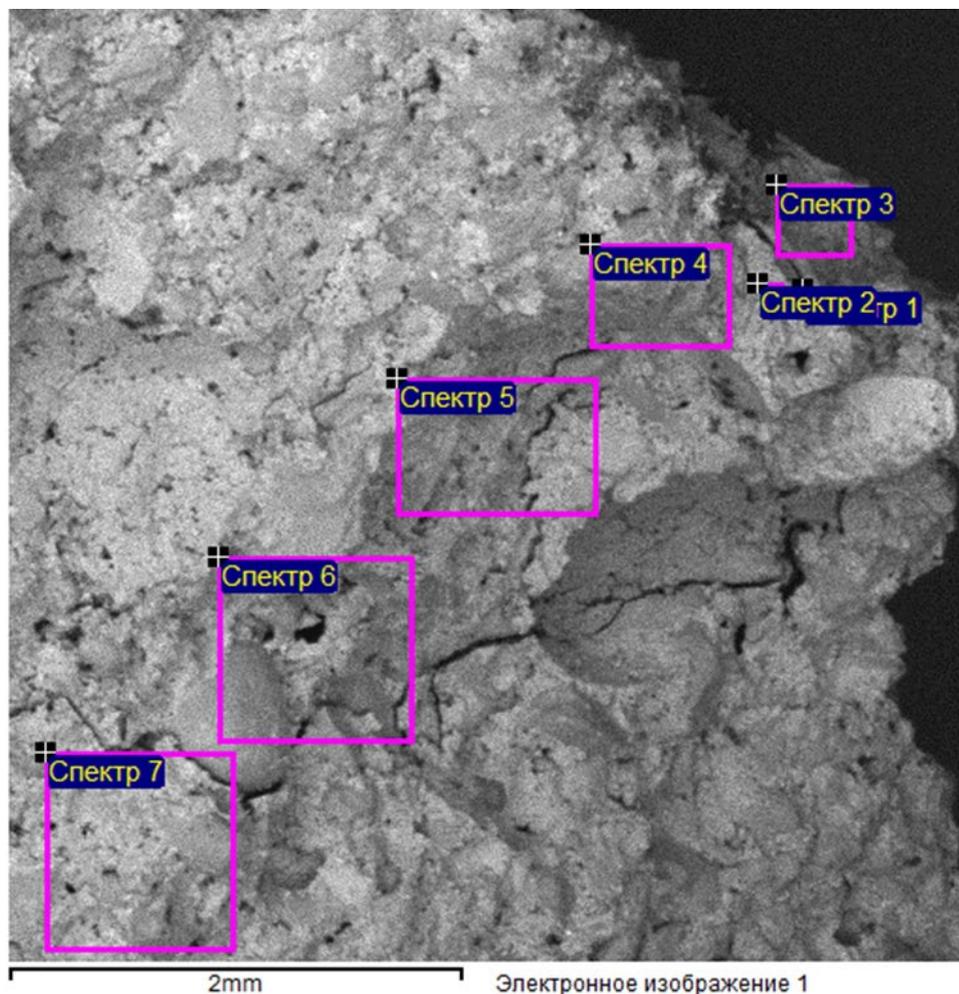
121. WTA-Merkblatt 2-9-04 Sanierputzsysteme, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege WTA e.V., München.

ПРИЛОЖЕНИЯ

к диссертации Ступак М.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. – Строительные материалы и изделия на тему:
Сухие штукатурные смеси для санирования засоленных кирпичных кладок

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

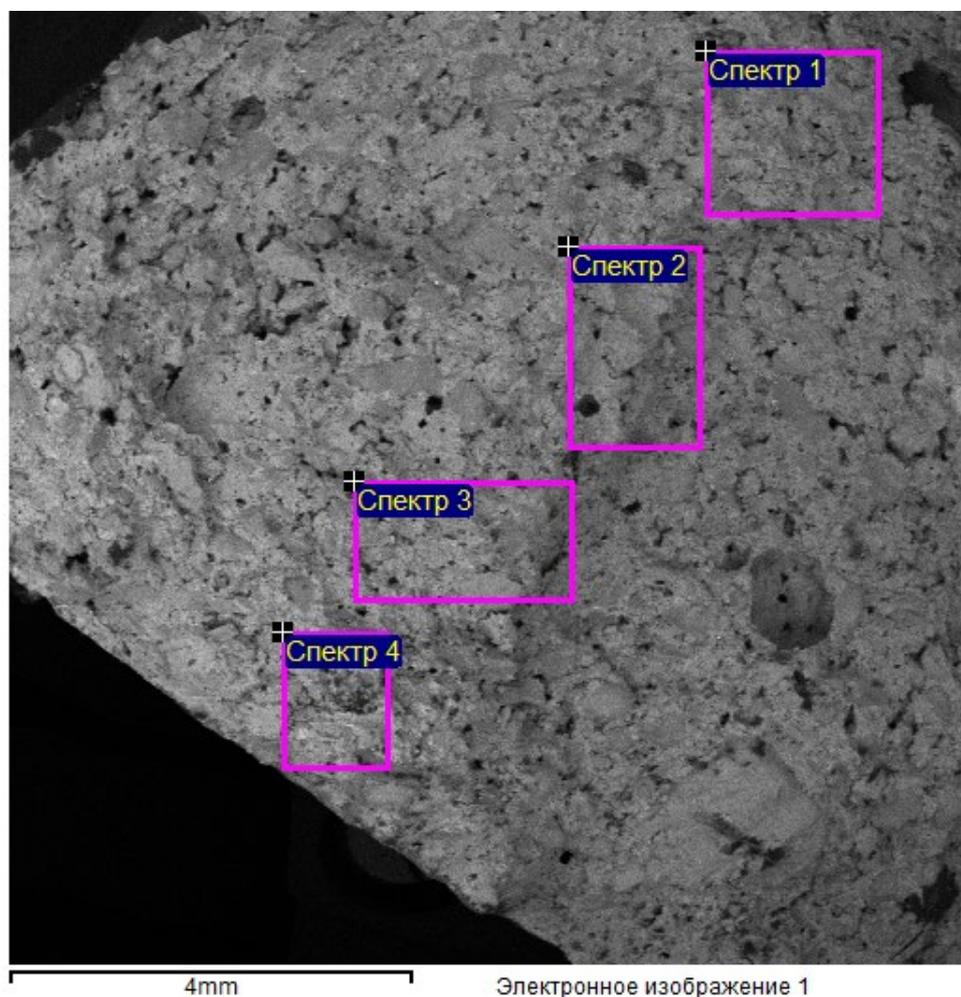
Контрольный вариант



Место определения содержания Cl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Cl в объеме материала, %
Поверхность керамического кирпича	Спектр 3	-
На расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 2	-
	Спектр 4	0,28
На расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 5	0,75
	Спектр 6	0,54
	Спектр 7	0,55

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

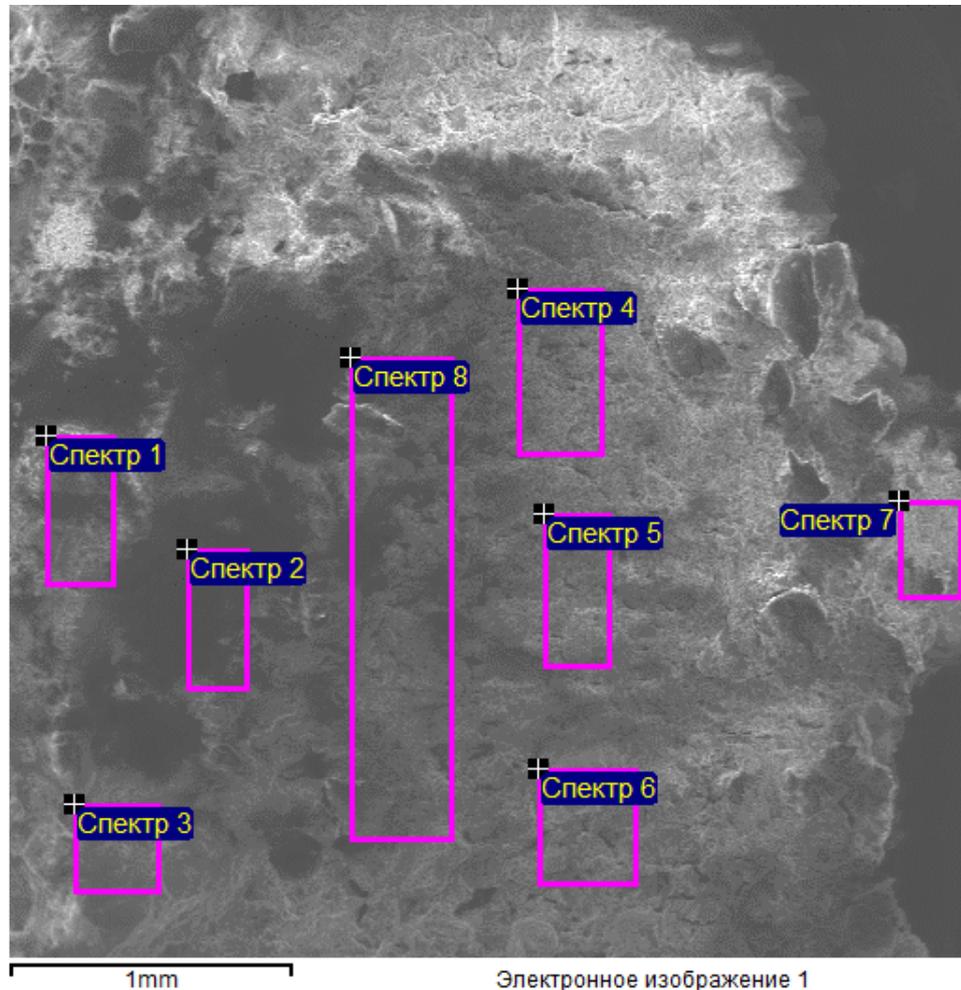
Контрольный вариант (лицевая поверхность штукатурного слоя)



Место определения содержания Cl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Cl в объеме материала, %
Лицевая поверхность штукатурного слоя	Спектр 1	-
	Спектр 2	1,06
	Спектр 3	1,32
	Спектр 4	1,01

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

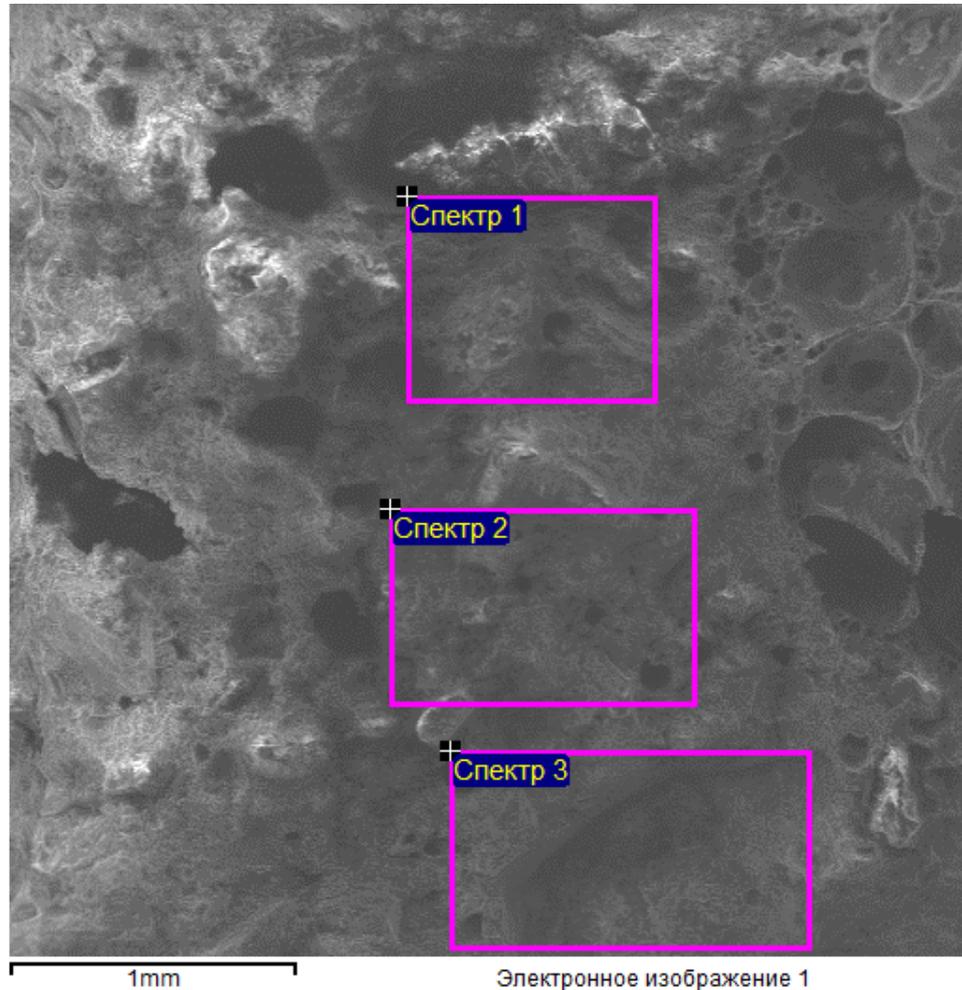
Вариант 1 (содержание в смеси перлитового песка – 20%)



Место определения содержания Cl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Cl в объеме материала, %
Поверхность керамического кирпича	Спектр 7	-
На расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 4	-
	Спектр 5	-
	Спектр 6	-
	Спектр 8	0,43
На расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 1	0,84
	Спектр 2	1,89
	Спектр 3	1,18

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

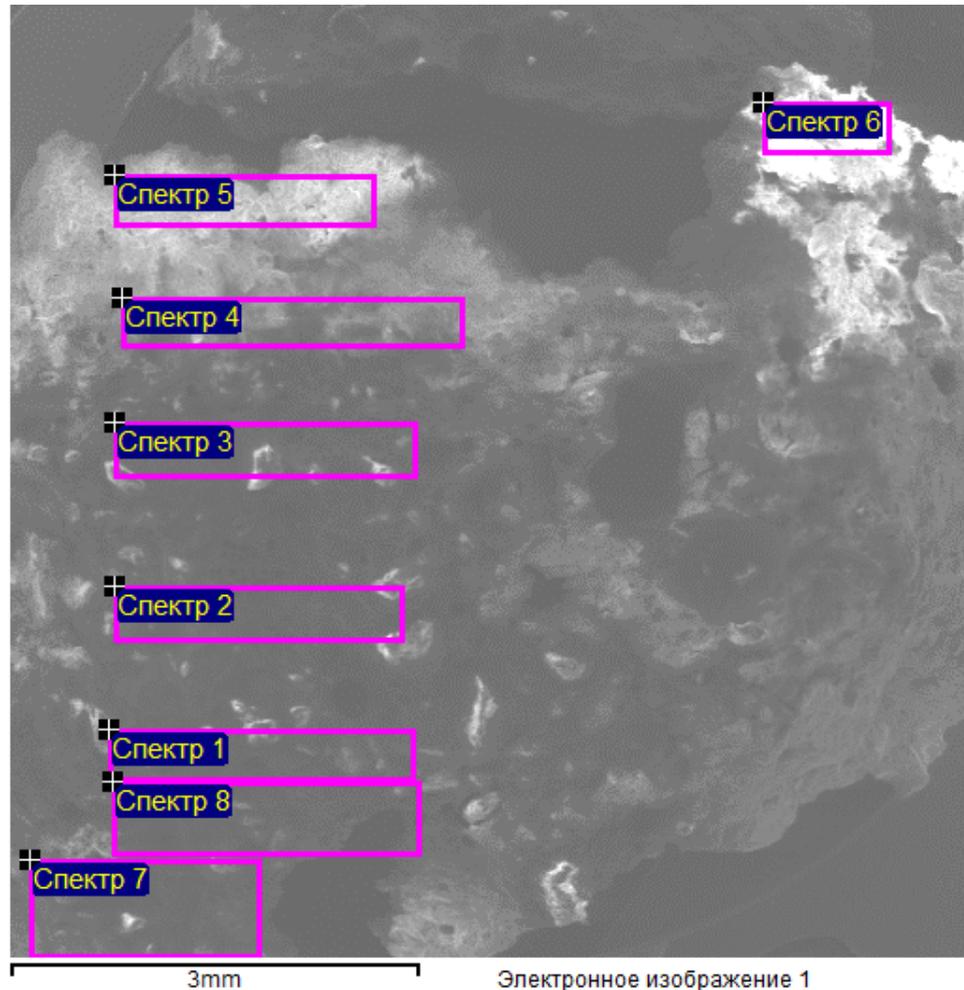
Вариант 1 (содержание в смеси перлитового песка – 20%) – лицевая поверхность штукатурного слоя



Место определения содержания Сl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Сl в объеме материала, %
Лицевая поверхность штукатурного слоя	Спектр 1	Наличие Сl не установлено
	Спектр 2	
	Спектр 3	

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

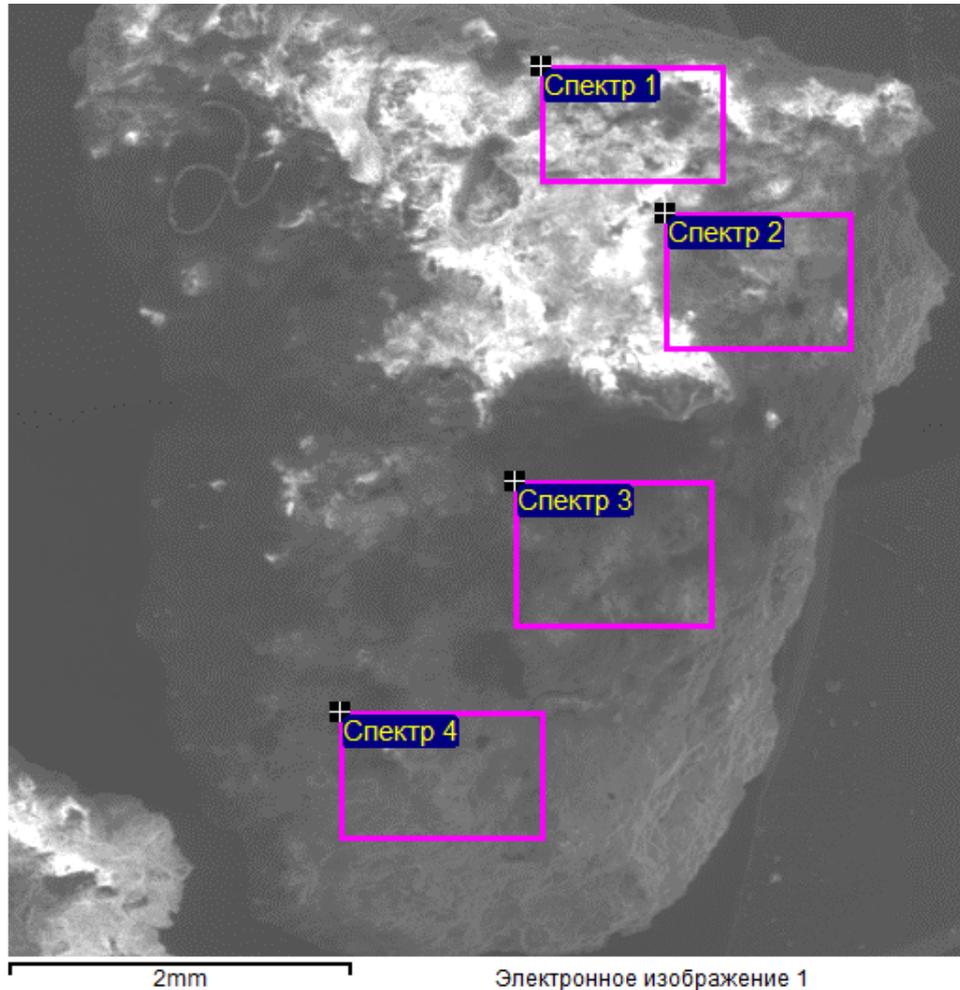
Вариант 2 (содержание в смеси перлитового песка – 20%, гранулированного песка – 7,5%)



Место определения содержания Сl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Сl в объеме материала, %
Поверхность керамического кирпича	Спектр 7	-
На расстоянии до 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 8	1,52
	Спектр 1	1,34
	Спектр 2	1,33
На расстоянии свыше 5 мм от поверхности керамического кирпича	Спектр 3	1,28
	Спектр 4	0,85
	Спектр 5	-
	Спектр 6	-

Приложение А – Результаты рентгеноспектрального анализа с использованием электронного сканирующего микроскопа

Вариант 2 (содержание в смеси перлитового песка – 20%, гранулированного песка – 7,5%) – лицевая поверхность штукатурного слоя



Место определения содержания Сl по сечению образца	№ Спектра	Содержание Сl в объеме материала, %
Лицевая поверхность штукатурного слоя	Спектр 1	Наличие Сl не установлено
	Спектр 2	
	Спектр 3	
	Спектр 4	

Приложение Б – Акт о внедрении

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ООО «РУНИТ»

А. Б. Кузнецов

«05» февраля 2024 г.

**АКТ**

Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»: профессор кафедры «ТСМиМ», д.т.н. Харитонов А.М., аспирант кафедры «ТСМиМ» Ступак М.В., с одной стороны, и представитель ООО «Рунит», главный технолог Е. В. Морозова, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в августе 2023 года на производственной площадке ООО «Рунит» была изготовлена опытно-промышленная партия сухой штукатурной санирующей смеси объемом 10 тонн, состав которой был разработан в соответствии с разработками СПбГАСУ, выполненными в рамках диссертационных исследований М.В. Ступак.

Указанная партия была применена на фасадах объекта, расположенного по адресу: г. Санкт-Петербург, проспект Стачек, д. 226. Общая площадь, оштукатуренная с использованием санирующей сухой смеси, составляет около 200 м². Результаты мониторинга состояния отделки в течение 5 месяцев с момента окончания работ позволяют сделать вывод о соответствии рассматриваемой штукатурной смеси требованиям, предъявляемым к составам для защиты кирпичных кладок от солевой коррозии.

от ООО «Рунит»:



Е. В. Морозова

от ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»:



А. М. Харитонов



М. В. Ступак

