

На правах рукописи



Шейкин Евгений Валерьевич

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ КАМЕННОЙ КЛАДКИ НА ИХ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ИСТОРИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЯХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»)

Научный руководитель: **Степанова Валентина Федоровна**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Красильников Игорь Викторович**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный
политехнический университет», кафедра
«Естественные науки и техносферная
безопасность», и. о. заведующего кафедрой

Богданов Андрей Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра технологий строительного
производства, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследова-
тельский Московский государственный строи-
тельный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва

Защита состоится «22» апреля 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НИЦ Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» февраля 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 54.1.002.01,
кандидат технических наук



Смирнова Л.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большинство исследований, касающихся механизмов разрушения пористых материалов от циклического увлажнения связано с однородными структурами. Практически отсутствуют исследования механизмов разрушения систем из 2-ух и более компонентов, подверженных периодическому увлажнению в течение десятков, а то и сотен лет. Вопросы влияния влажности материалов кладочных систем на их физико-механические свойства, а также методика их диагностики остаются неизученными. Это не позволяет оценить состояние материалов конструкций ОКН и выявить механизм их разрушения от циклического увлажнения. В связи с этим, исследование механизма разрушения от циклического увлажнения материалов внутри каменной кладки ОКН является актуальным.

Степень разработанности темы. Представленные в литературе механизмы разрушения от циклического увлажнения, в основном, посвящены однородным материалам или поверхностным слоям конструкций, и практически отсутствуют исследования, посвященные материалам в объеме конструкций. Вопросы механизма разрушения внутренних слоев материалов каменной кладки конструкций ОКН под воздействием влаги и методики их исследования остаются неизученными, что не позволяет выявить причину разрушения. Разрабатываемое в работе направление является новым в части методики исследований и решаемых задач.

Научная гипотеза. Трансформация пористой структуры материалов каменной кладки конструкций ОКН при циклическом воздействии на них влаги, в том числе с учетом знакопеременных температур, является саморазвивающимся динамическим процессом. Оценка этого процесса возможна в формате комплексного подхода, включающего, как воздействие влаги, так и, собственно, изменение физико-механических свойств материалов каменной кладки конструкций ОКН.

Объект исследования: Материалы каменной кладки исторических конструкций ОКН, подверженные долговременному циклическому увлажнению.

Предмет исследования: Трансформация структуры и изменение физико-механических свойств материалов каменной кладки конструкций ОКН, подвергающихся долговременному циклическому воздействию влаги.

Цель исследования: Оценка влияния долговременного циклического увлажнения материалов каменной кладки, в том числе с учетом знакопеременных и отрицательных температур, на трансформацию их физико-механических свойств в конструкциях объектов культурного наследия.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведение анализа зарубежных и отечественных литературных источников, выявление критериев уязвимости и закономерностей трансформации свойств пористой системы материалов под воздействием циклического увлажнения.
2. Разработка и внедрение в практику малоинвазивного (квази-неразрушающего) метода отбора проб, позволяющего получать образцы материала для исследования.

3. Проведение экспериментальных исследований образцов, отобранных из реальных конструкций ОКН, и определение основных признаков деградации материалов каменной кладки конструкций ОКН.
4. Разработка методического подхода к оценке состояния анализируемых материалов, статистическая обработка и теоретическое обоснование механизма разрушения материалов каменной кладки конструкций ОКН под воздействием долговременного циклического увлажнения.
5. Обоснование критерия (индекса) деструкции для оценки состояния материалов исторической кладки конструкций ОКН, подверженных длительному циклическому увлажнению, путем сопоставления физических и структурно-механических свойств материалов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено, что распределение влажности в каменной кладке исторических конструкций преимущественно определяется не свойствами пористой системы материалов, а их развитой пустотностью.
2. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что разрушительное воздействие циклического увлажнения на пористую систему материалов систем кладочного типа определяется аккумуляцией на границе пустот (в области внутренних зон испарения) содержащихся в воде примесей с последующей активизацией усадочно-деформативного и кристаллизационного механизмов разрушения.
3. Установлено, что долговременное циклическое воздействие влаги, в том числе с учетом знакопеременных и отрицательных температур, на материалы каменной кладки исторических конструкций, приводит к формированию внутренних микротрещин и микрообломков, что сопровождается трансформацией структуры материалов, в частности, уменьшением до нанометрических размеров среднего размера пор, и увеличением в несколько раз удельной площади поверхности и сорбционных характеристик.
4. Предложен критерий (индекс деструкции), позволяющий оценить степень разрушения материалов кладки на основании косвенных признаков (средний вес образца пробы, доля материала в пробе, весовые потери образцов).

Теоретическая значимость:

1. Выявлены и теоретически обоснованы закономерности распределения влажности в материалах каменной кладки конструкций ОКН.
2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден механизм деструкции материалов в системах кладочного типа конструкций ОКН, подверженных длительному циклическому увлажнению.
3. Разработана методика оценки состояния материалов в системах кладочного типа исторических конструкций ОКН на основе предложенного критерия – индекса деструкции.

Практическая значимость:

1. Разработана и внедрена в практику малоинвазивная (квази-неразрушающая) методика отбора проб, позволяющая проводить

инструментальные обследования материалов кладки конструкций ОКН без значимых повреждений.

2. Адаптирована и внедрена в практику методика лабораторных исследований микрокернов материалов систем кладочного типа.
3. Разработана и внедрена в практику методика оценки состояния материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН, подвергающихся долговременному циклическому увлажнению.

Методология и методы исследования. Методология работы основывается на результатах натурных исследований памятников архитектуры, лабораторных исследований материалов исторических конструкций и современных строительных материалов, элементах теории капиллярности, сушки, адсорбции, массопереноса, солевого и морозного разрушения, долговечности и уязвимости пористых материалов. При выполнении экспериментальных исследований применялись стандартизированные методы, частично адаптированные и переработанные соискателем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Малоинвазивная методика отбора проб (микрокернов), позволяющая проводить исследование материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН.
2. Методика анализа и интерпретации результатов исследования материалов на основе контрольного горизонтального сечения (зондажа), позволяющая оценить распределение влажности и физико-механических свойств материалов, источники увлажнения, внутренние зоны испарения, наиболее уязвимые участки каменной кладки исторических конструкций.
3. Механизм разрушения материалов в системах кладочного типа под воздействием долговременного циклического увлажнения.
4. Критерий (индекс) деструкции, позволяющий оценить состояние материалов на основании косвенных признаков.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением при проведении экспериментальных исследований стандартных методик испытаний, адаптированных под микроразмеры используемых образцов. Полученные результаты и сделанные выводы не противоречат данным предыдущих исследований.

Личный вклад автора в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в разработке методики отбора проб, методологии проведения экспериментов и оценки полученных результатов, систематизации существующих исследований по теме диссертации, предложении механизма разрушения материалов в кладке, разработке критерия (индекса) деструкции материала. Постановка и проведение научно-технических исследований конструкций ОКН по разработанной методике и анализ физико-механических свойств материалов исторической кладки также выполнены лично автором.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены на международной практической конференции «Сохранение культурного наследия. Исследование и реставрация» (СПб, 2014), научной конференции «Давидовские чтения» (М, 2015), на международной научно-методической конференции, посвященной 60-летию ГосНИИР (М, 2017), на VII Международном научно-

практическом симпозиуме «Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси» (Сергиев Посад, 2020), на научно-практической конференции «Давидовские чтения», посвященной 75-летию ЦНРПМ (М, 2022), III Национальной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные экологические проблемы современных городов» (Иваново, 2025).

Внедрение результатов исследований. Результаты исследования использовались при выполнении инженерно-технических исследований и в ходе реставрационных работ более чем 30 памятников архитектуры, в частности: Смоленский собор Новодевичьего монастыря, собор Рождества Богородицы Ферапонтова монастыря, церковь Ризоположения Московского Кремля, Судная палата Московского Кремля, Башни Московского Кремля, Спасо-Преображенский собор Соловецкого Кремля, церковь Косьмы и Дамиана в Суздале, Успенский собор Рязанского Кремля, Георгиевский собор в Юрьеве-Польском, церковь Николы Мокрого в Ярославле, Успенский собор в Смоленске, Успенский собор Княгинина монастыря во Владимире.

Результаты исследования были учтены при внесении поправок в 8 главу («Исследование температурно-влажностного режима) ГОСТ 55567-2013 «Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры».

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 11, 17 паспорта специальности 2.1.5 «Строительные материалы и изделия».

Публикации. Материалы диссертационного исследования были изложены в 11 публикациях в научных журналах и сборниках трудов конференций, в том числе 3 работы – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ (1,7 печатных листа, из них 1,7 печатных листа выполнены автором).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 385 наименований, в том числе 315 на иностранном языке. Полный объем диссертации – 205 страниц. Диссертация содержит 94 рисунка и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные элементы научной новизны, приведена общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована практическая значимость, реализация и апробация результатов исследования.

В первой главе представлен обзор исследований по теме диссертации. Показано, что существующие на данный момент методики и подходы к вопросам исследования памятников архитектуры не предоставляют требуемых комплексных решений, в связи с чем, отсутствует возможность определения состояния и выявления механизмов разрушения материалов каменной кладки конструкций

ОКН. По результатам аналитического обзора отечественной и зарубежной литературы сформулированы научная гипотеза и цель исследований.

Во второй главе приведена методика исследований. Для возможности работы с историческими конструкциями была разработана малоинвазивная методика, позволяющая получать микрокерны Ø7 мм. Лабораторные исследования отобранных материалов проводились на основе стандартизированных методик, частично переработанных автором с учетом специфики микроразмеров образцов. Оценивались естественная влажность, первичная и вторичная сорбционная влажность (соответственно, неочищенных и очищенных от примесей образцов), водопоглощение при атмосферном и повышенном давлении, пористость, плотность, микроструктура, прочность на сжатие, скорость звуковой волны, степень засоленности, морозостойкость. По результатам рассчитывались коэффициент насыщения, степень микропористости (отношение максимальной сорбции к водопоглощению), удельная площадь поверхности, средний размер пор. Представленная методика легла в основу разработки подхода к выбору участков отбора проб на объекте и анализа результатов лабораторных исследований, представленных в главах 3, 4.

В третьей главе научно обоснован и практически подтвержден подход к выбору участков отбора проб материалов для лабораторных исследований. На основе результатов экспериментальных исследований показано, что поверхностные явления, фиксируемые в процессе визуального обследования, не всегда позволяют оценить подверженность кладки увлажнению. Кроме того, визуальные признаки изменения поверхности не позволяют учесть временной фактор, поскольку могут быть связанными с разовыми или циклическими событиями, уже завершенными на момент проведения обследования.

Конструкции одного объекта, включая относительно близко расположенные участки, могут находиться в разных условиях с точки зрения доступа влаги и, соответственно, с точки зрения развития процессов деструкции. Сказанное относится не только к выбору участков в плане здания, но также и к определению количества проб по высоте и глубине горизонтальных контрольных сечений – зондажей. В условиях кладочных систем изменение влажности в горизонтальном сечении стены, как правило, носит ярко выраженный зигзагообразный характер. Аналогичная неоднородность в распределении влажности может наблюдаться и по высоте стены, когда влажность материалов на более высокой отметке, то есть находящихся дальше от источника увлажнения, превышает влажность материалов, на более низкой отметке, то есть находящихся ближе к источнику увлажнения. Подобные «перекосы» возникают в процессе высыхания материалов с различными свойствами или пустотностью (Рисунок 1). В связи с этим, выбор контрольных участков предлагается производить на основе равномерной, статистически достаточной, сетки контрольных горизонтальных сечений – зондажей. Сформулированные принципы легли в основу получения образцов для анализа состояния материалов, представленного в главе 4.

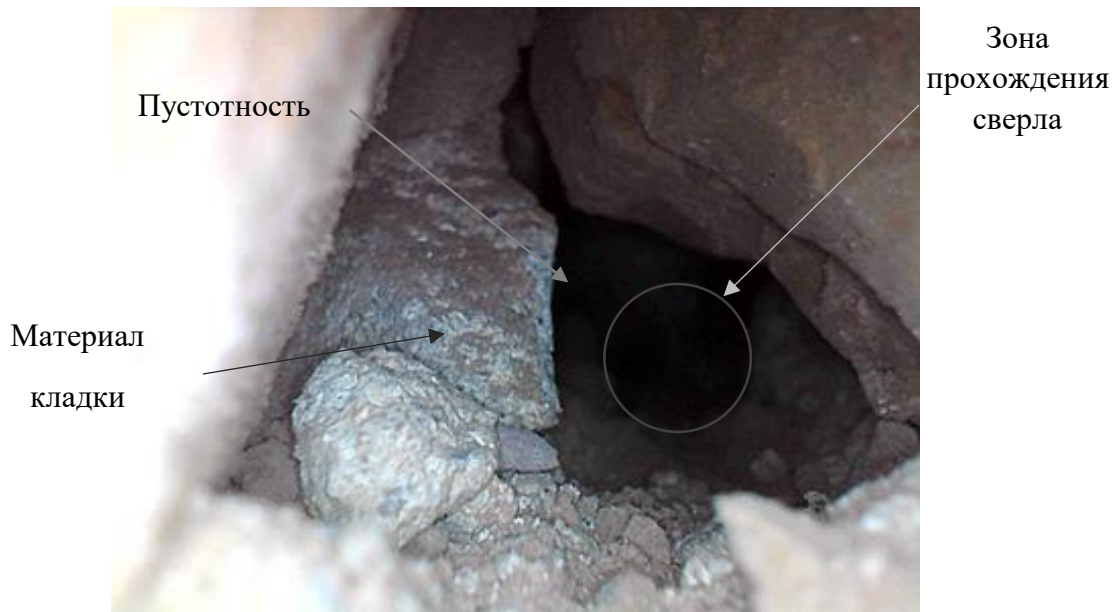


Рисунок 1 – Пустотность в кладке на глубине 24 см на примере Успенского собора в Смоленске

В четвертой главе представлена методика интерпретации полученных результатов. Анализ влажностных параметров материалов в рамках контрольных горизонтальных сечений – зондажей проводился на основе величины относительной влажности материалов θ , полученной путем нормализации естественной влажности материалов W (степени увлажнения материала в кладке) относительно водопоглощения при атмосферном давлении, что позволило сравнивать влажность материалов с разными свойствами. Разделение θ на капиллярную (θ_c) и сорбционную (θ_s) составляющие позволило определить источник поступления влаги. Для выявления причин аккумуляции влаги по глубине контрольного сечения проводилось сопоставление влажностных характеристик с пористостью и средним размером пор (d_{cp}) (Таблица 1, 2; Рисунок 2, 3).

Таблица 1 – Сопоставление влажностных характеристик и физических свойств материалов по глубине контрольного сечения на примере Смоленского собора Новодевичьего монастыря

Глубина отбора проб (см)	Относительная влажность материалов (θ)	Капиллярная составляющая влажности (θ_c)	Сорбционная составляющая влажности (θ_s)	Средний размер пор (d_{cp} нм)
1 - 4	47	0	47	0
8 - 12	47	42	5	56
23 - 26	75	66	9	1
26 - 28	100	79	21	14
38 - 40	100	83	17	16
40 - 43	57	0	57	1
43 - 46	100	75	25	2
46 - 48	100	83	17	314
58 - 63	27	24	3	189

Таблица 2 – Сопоставление влажностных характеристик и физических свойств материалов по глубине контрольного сечения на примере церкви в Киово в Лобне

Глубина отбора проб (см)	Относительная влажность материалов (θ)	Капиллярная составляющая влажности (θ_c)	Сорбционная составляющая влажности (θ_s)	Средний размер пор (d_{cp} нм)
0 - 2,2	29	0	29	6
2,2 - 7,2	22	3	19	34
7,2 - 13,2	19	5	14	38
13,2 - 22	12	8	4	128
22 - 28	8	7	1	89
28 - 33,7	18	6	12	113
33,7 - 36,6	58	0	58	8
36,6 - 42,1	59	14	45	24
42,1 - 44,9	3	2	1	357

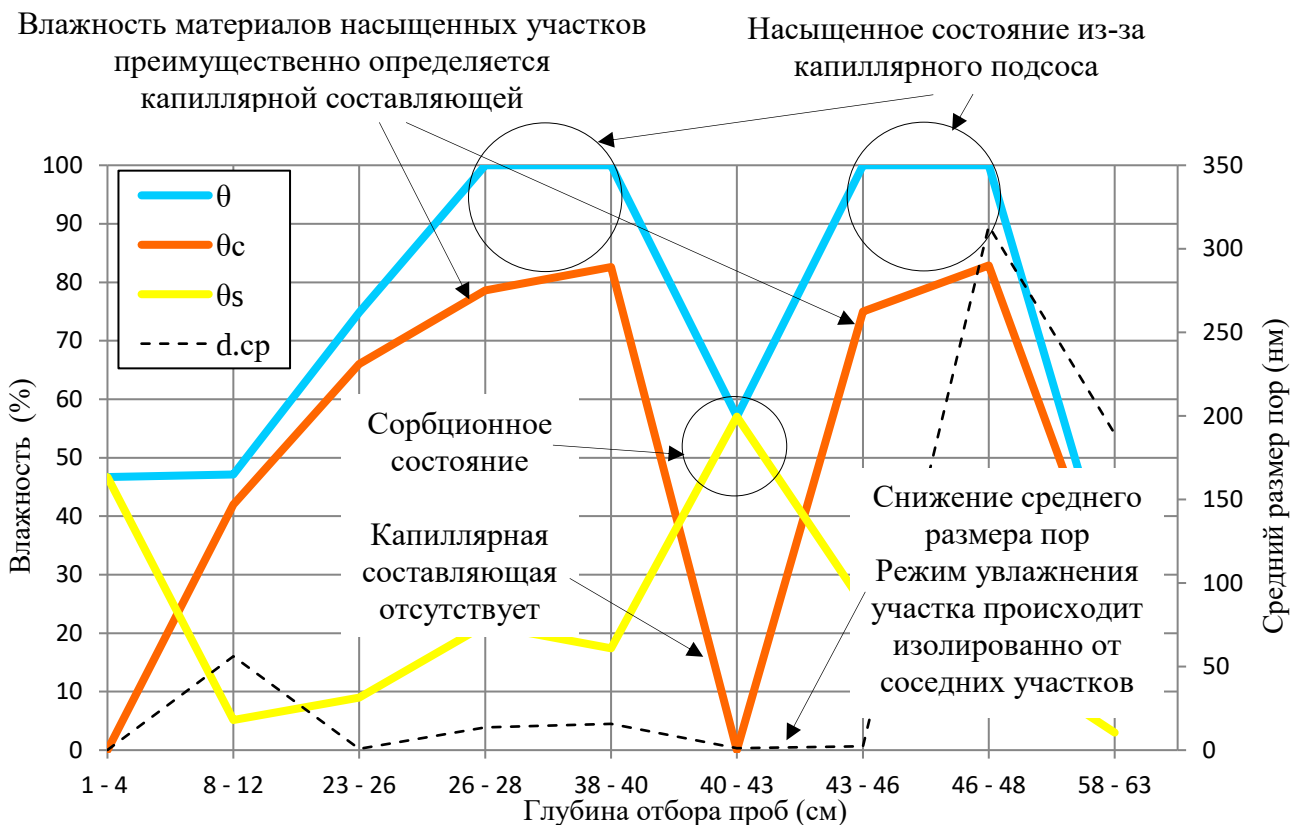


Рисунок 2 – Сопоставление влажностных характеристик и физических свойств материалов по глубине контрольного сечения на примере Смоленского собора Новодевичьего монастыря

Сорбционная влага играет в исторической кладке значимую роль, поскольку определяется не только реальным изменением геометрии пористой системы, но и примесями, гигроскопичность которых может значительно превышать гигроскопичность самого материала. С другой стороны, накопление примесей в порах на границе с зоной испарения приводит к их сужению, что также способствует возрастанию гигроскопичности материала. Отсюда, возрастание сорбционных свойств материалов может носить, как истинный (реальное изменение структуры пор), так и кажущийся (накопление примесей) характер.

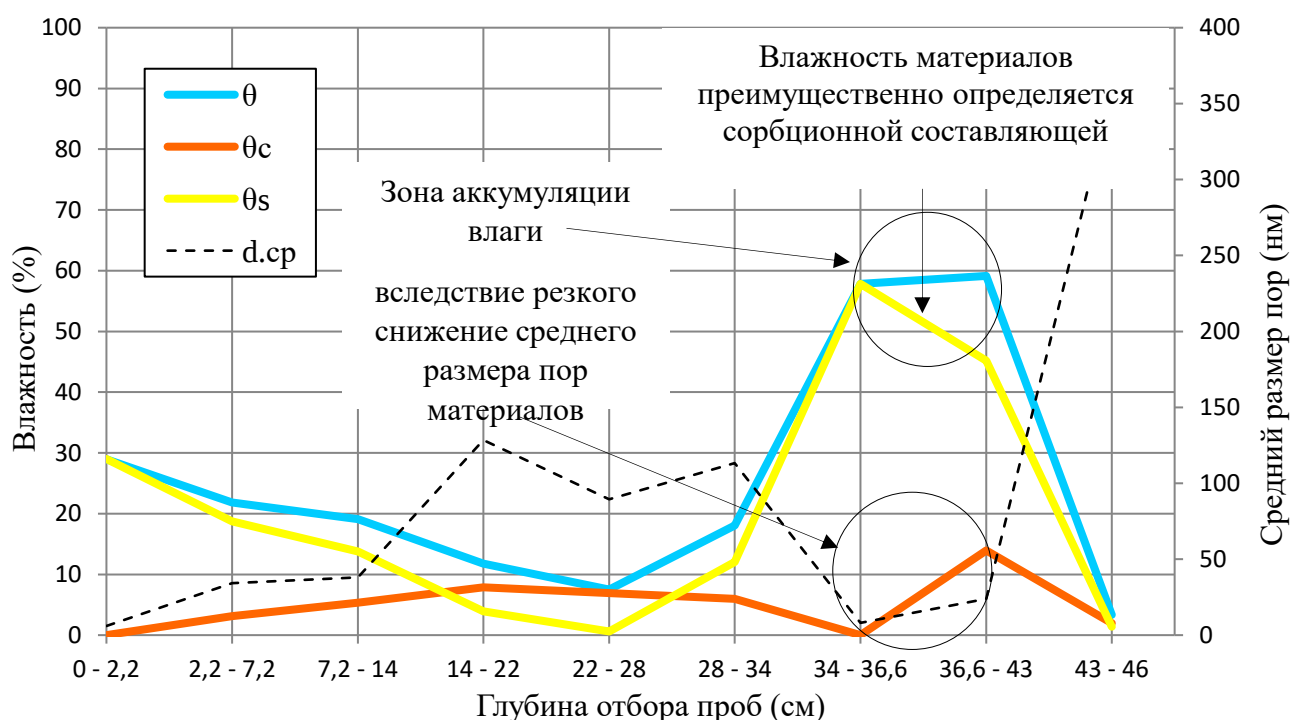


Рисунок 3 – Сопоставление влажностных характеристик и физических свойств материалов по глубине контрольного сечения на примере церкви в Киово в Лобне

Определить природу явления возможно путем сравнения свойств материалов до и после очищения от примесей. Чем больше разница между первичными (до промывки образцов) и вторичными (после промывки образцов) сорбционными характеристиками, тем больше физические свойства материалов в кладке определялись аккумуляцией примесей. Чем меньше разница между первичными и вторичными сорбционными характеристиками, тем более возрастание сорбционных характеристик материалов связано с развитием сети микротрещин (Таблица 3, 4; Рисунок 4, 5).

Таблица 3 – Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении на примере церкви Николы Мокрого в Ярославле

глубина (см)	Степень микропористости по данным первичной сорбции ($P_{0,1-1}$)	Степень микропористости по данным вторичной сорбции ($P_{0,1-2}$)	Удельная площадь поверхности по данным первичной сорбции ($S_{уд1}$)	Удельная площадь поверхности по данным вторичной сорбции ($S_{уд2}$)
0,5 - 4	7	1	1,3	0,6
8 - 12	2	1	0,3	0,0
23 - 28	23	18	8,9	8,1
38 - 45	8	8	2	2,9
45 - 48	48	26	3,4	3,6
58 - 65	0	0	0,2	0,2

Таблица 4 – Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении на примере Успенского собора в Смоленске

глубина (см)	Степень микропористости по данным первичной сорбции ($P_{0,1-1}$)	Степень микропористости по данным вторичной сорбции ($P_{0,1-2}$)	Удельная площадь поверхности по данным первичной сорбции ($S_{уд1}$)	Удельная площадь поверхности по данным вторичной сорбции ($S_{уд2}$)
0,5 - 5	56	14	28,4	10,7
8 - 15	17	21	3,0	6,6
28 - 35	35	40	10,0	8,4
38 - 40	68	67	82,5	42,4
40 - 45	13	6	2,9	1,3
56 - 62	5	1	1,5	0,3

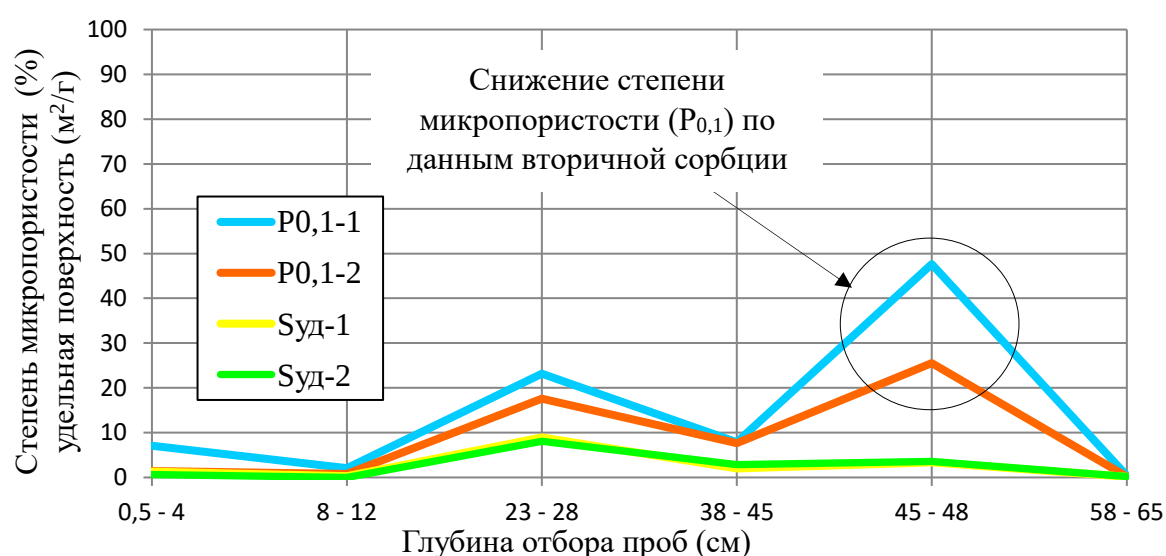


Рисунок 4 – Снижение степени микропористости $P_{0,1}$ (отношение максимальной сорбции к водопоглощению) после очищения образцов от примесей (по данным вторичной сорбции) на примере церкви Николы Мокрого в Ярославле

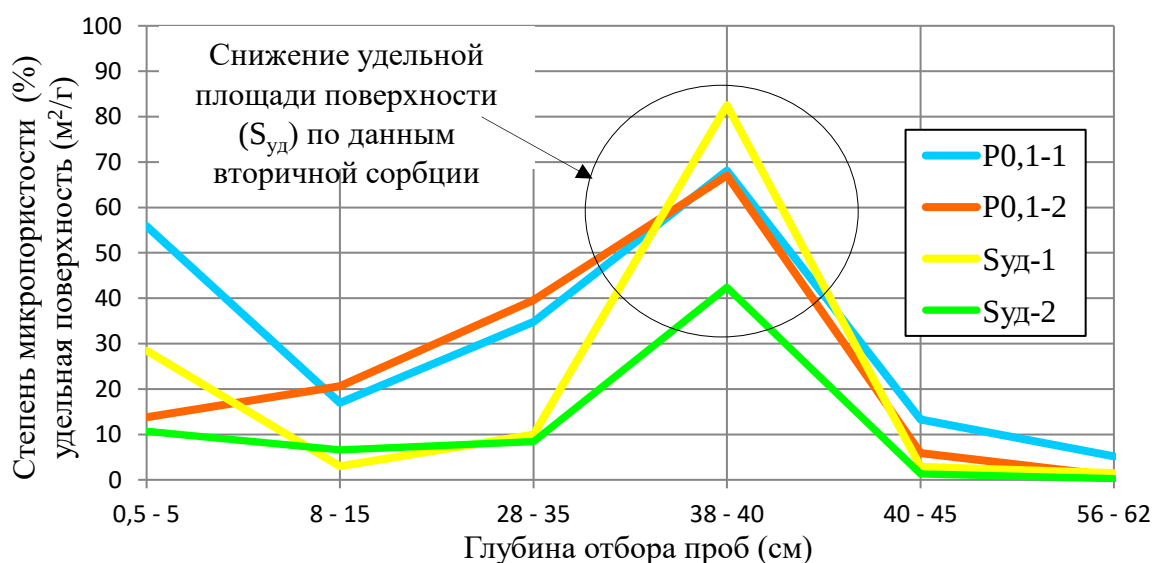


Рисунок 5 – Снижение удельной площади поверхности $S_{уд}$ после очищения образцов от примесей (по данным вторичной сорбции) на примере Успенского собора в Смоленске

Исследование структурно-механического состояния материалов анализируемого участка, базировалось на среднем весе образца в пробе, доле твердой части материала в пробе и весовых потерях образца после финишного цикла увлажнения / высыхания. Первые две характеристики связаны с размером и формой образцов проб. В случае материалов с небольшим количеством микротрещин и достаточными когезионными свойствами вибрационная нагрузка сверла влияет только на длину керна, оставляя неизменной его цилиндрическую форму. В случае материалов с низкими когезионными свойствами вибрационная нагрузка приводит к нарушению цилиндрической формы и дефрагментации керна на осколки, тем более мелкие, чем более развитой является сеть внутренних микротрещин. Показано, что размер и вес образца отражают его прочностные характеристики. Чем лучше состояние материала, тем больше размер и вес образца. Последняя, третья, структурно-механическая характеристика базируется на оценке весовых потерь очищенных от примесей образцов, свидетельствующих об ослабленности структуры. Анализ структурно-механических характеристик позволил определять наиболее уязвимые зоны контрольных участков (Рисунок 6). Выводы, полученные в главе 4 положены в основу исследования влияния влажности материалов каменной кладки на их физико-механические свойства.

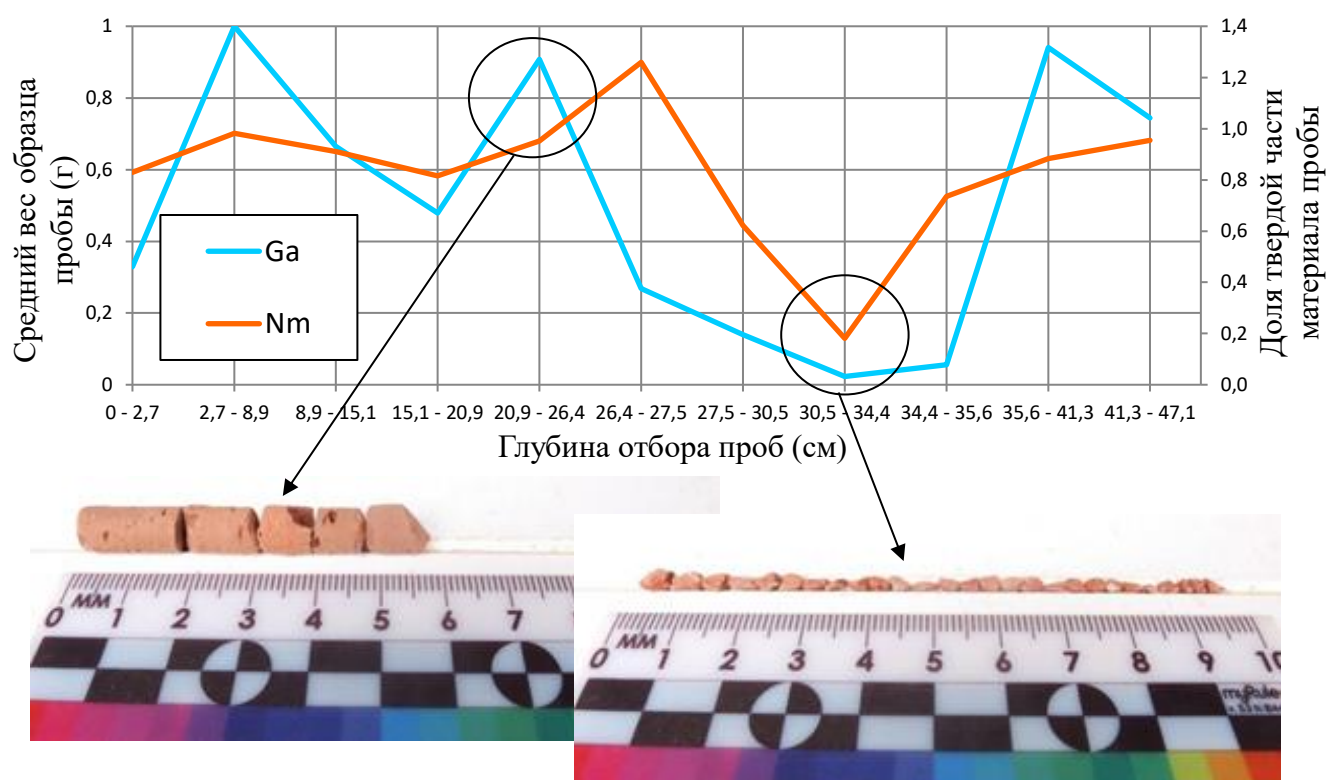


Рисунок 6 – Распределение значений среднего веса образцов (G_a) и доли твердой части проб (N_m) в контрольном сечении на примере здания 17М Духовной Академии в СПб

В пятой главе рассматривается влияние влажности материалов на их физико-механические свойства. Анализ полученных результатов показал, что распределение влажности в материалах каменной кладки конструкций ОКН может сопровождаться нарушением физических закономерностей, откуда был сделан вывод об определяющей роли пустотности. На первом этапе были

проанализированы перепады (281 шт.), наиболее явно продемонстрировавшие независимость распределения влажности от пористости (среднего размера пор). Из них только на 18 участках (менее 6%) не прослеживается каких-либо признаков, указывающих на существование внутренней пустотности. Полученные результаты позволяют предположить, что и на тех участках, где прослеживается видимая зависимость между влажностью и пористостью, данная зависимость может быть не более чем совпадением, тогда как на самом деле распределение влажности на данных участках также определяется пустотностью. В связи с этим, на втором этапе была проведена оценка по совокупности всех 2645 перепадов, показавшая, что только 245 из них (менее 9%) не имеют каких-либо признаков микротрещиноватости. Экспериментально доказано, что характер распределения влажности в исторических конструкциях, в первую очередь, определяется не пористостью материалов, а развитой пустотностью между ними.

Сопоставление полученных в результате исследований физических свойств материалов с физическими свойствами материалов по данным литературных источников показало, что исследованные материалы, в основном, имеют значительно меньший размер пор, выше удельную площадь поверхности и сорбционные характеристики (Рисунок 7, 8). Таким образом, показано, что изменения характеристик исследованных материалов каменной кладки конструкций объектов культурного наследия являются следствием долговременного воздействия влаги.

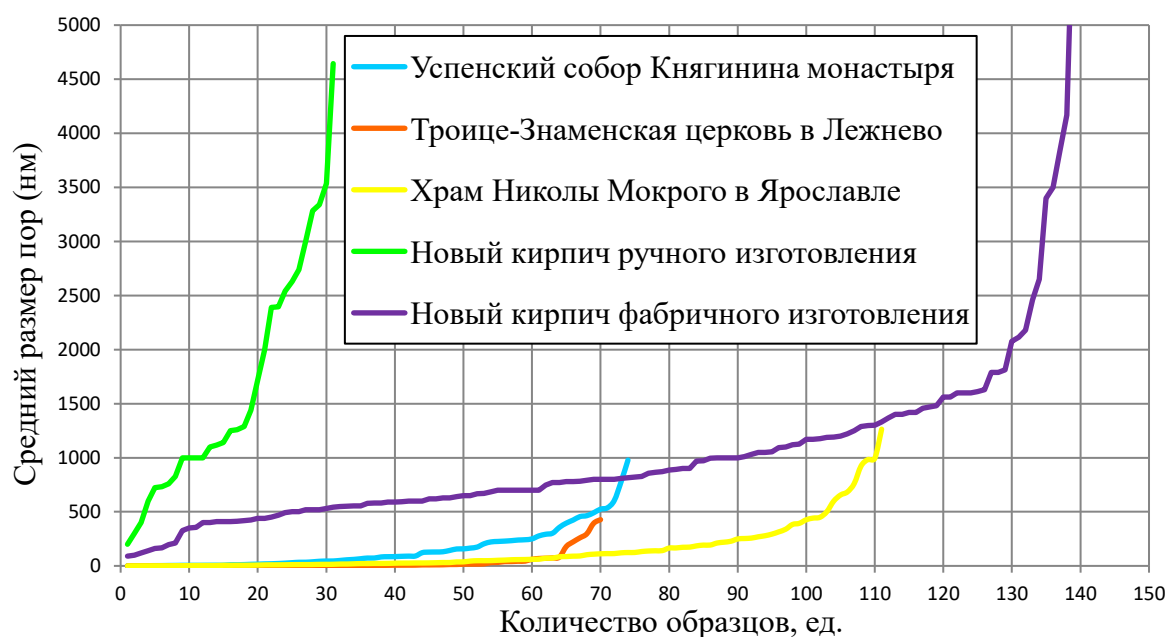


Рисунок 7– Сопоставление среднего размера пор исследуемых и новых кирпичей

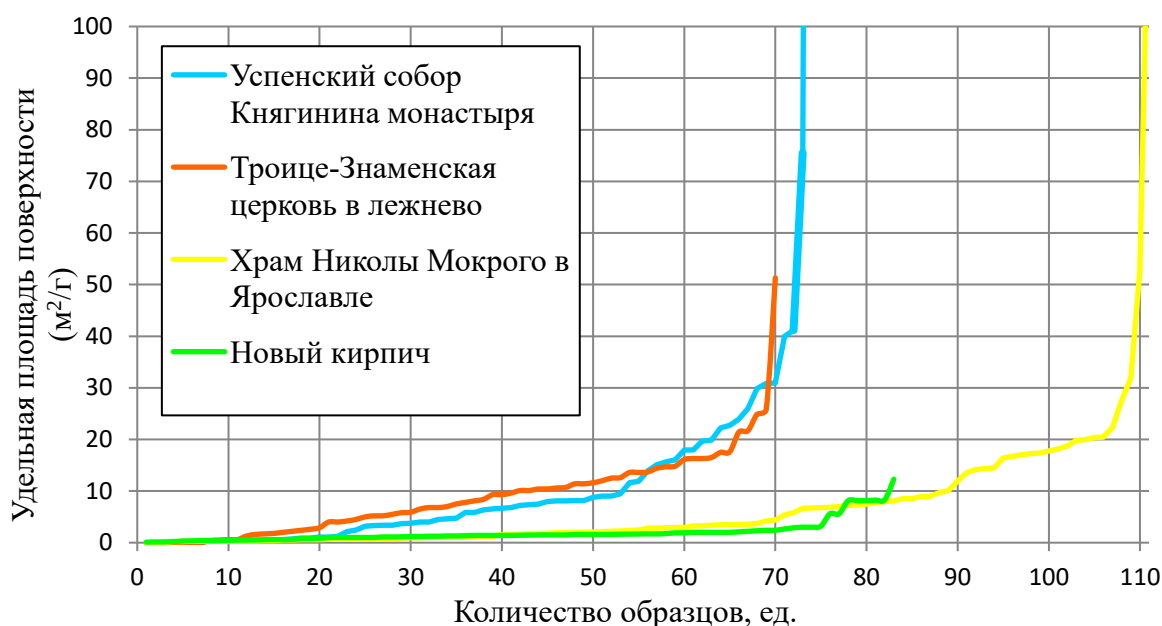


Рисунок 8 – Сопоставление удельной поверхности исследуемых и новых кирпичей

Существующие теории физического разрушения материалов от влаги, включая усадочно-деформативный и кристаллизационный (солевой, морозный) механизмы, утверждают определяющее влияние микропор менее 0,1 – 0,2 мкм. Поскольку в кирпичной кладке на известковом растворе изначально отсутствуют микропоры, то возникает два базовых вопроса: как функционирует механизм разрушения в отсутствии микропор, и за счет чего уменьшается размер пор.

Предложен механизм деструкции материалов каменной кладки под влиянием примесей, содержащихся в поступающей в кладку воде. На границе материалов кладочной системы существуют, как варианты с относительно сопоставимыми по размерам порами, не препятствующими перемещению жидкости, так и варианты с резкими перепадами размеров пор или пустотами, когда перемещение жидкости блокируется и возникает внутренняя зона испарения.

Испарение жидкости и сопутствующая испарению аккумуляция содержащихся в воде примесей приводят к уменьшению размера пор на границе с зоной испарения. В результате, поры изначально микронного размера постепенно уменьшаются, пока не перейдут границу 0,1 – 0,2 мкм, после чего на участке возникают условия для начала процесса разрушения. В узкой части поры активизируется усадочно-деформативный механизм в результате возрастания коэффициента влажностного расширения. Наличие в поступающей в кладку воде ионов солей или снижение температуры ниже нулевой отметки приводит к активизации кристаллизационного механизма, проявляющегося уже в широкой части поры. Воздействие обоих факторов способствует зарождению в районе зоны испарения сети микротрещин. Развитие и объединение сетей микротрещин приводит к образованию микрообломков, способных переноситься вместе с жидкостью к новым зонам испарения. Стадии развития процесса деструкции представлены на Рисунке 9.

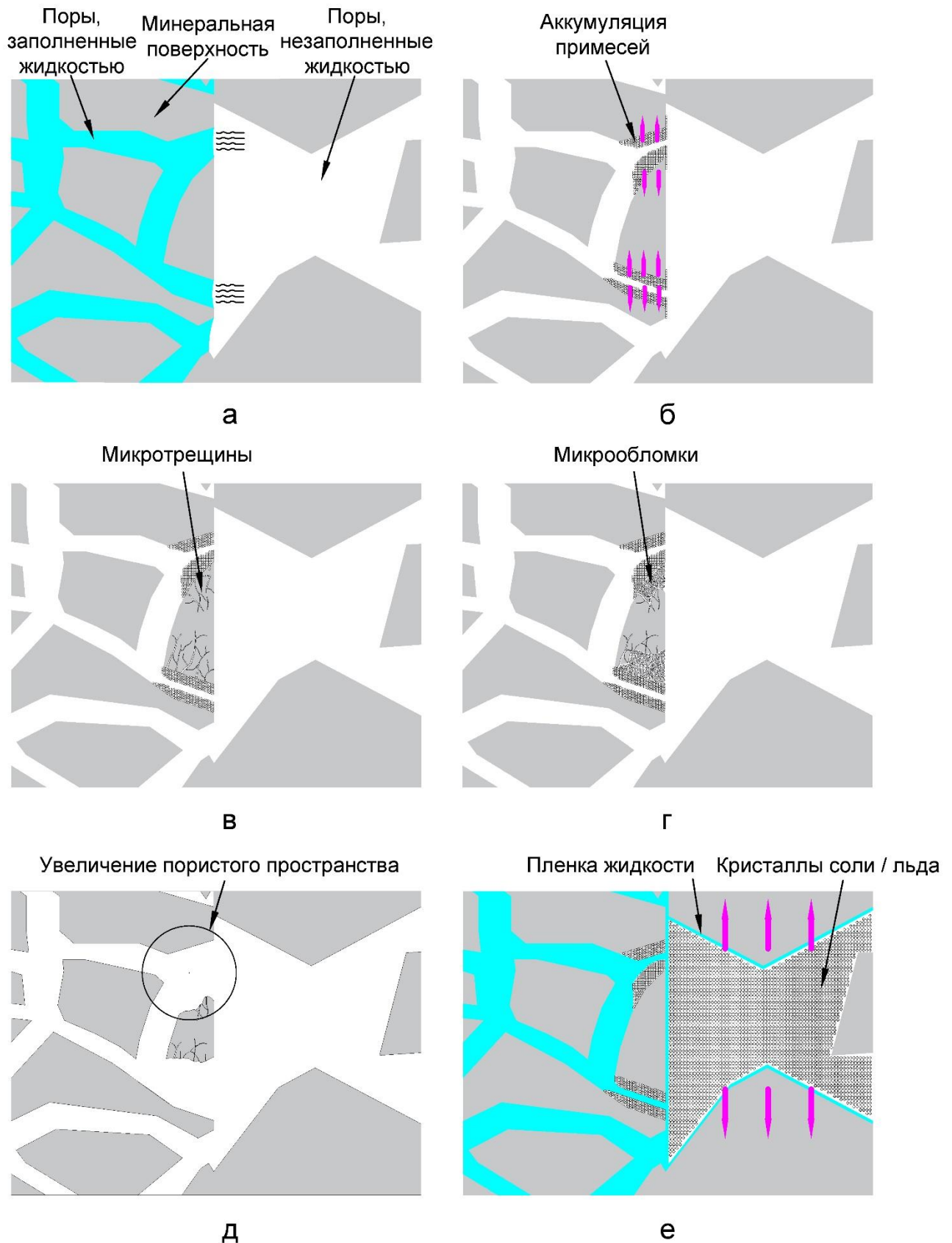


Рисунок 9 – Трансформация пористого пространства под влиянием механизмов разрушения. Зона испарения (а). Аккумуляция примесей (б). Формирование микротрещин (в). Разрушение поверхностного слоя (г). Увеличение объема поры в результате вымывания микрообломков (д). Кристаллизация солей (е).

Начало процесса деструкции связано с участками на границе материалов или пустотами, однако со временем, он распространяется и на объем основного блока. На Рисунках 10, 11 представлены фотографии образцов кирпича под электронным микроскопом, на которых отчетливо видны сети микро и макротрещины. Вывод о кристаллизации солей не только на внешней поверхности, но и в объеме кладки также подтверждается прямой оценкой распределения солей в кладке конструкций ОКН (Таблица 5, Рисунок 12). В соответствии с изложенным, изменение геометрии пор в процессе деструкции проходит в две стадии (Рисунок 13).

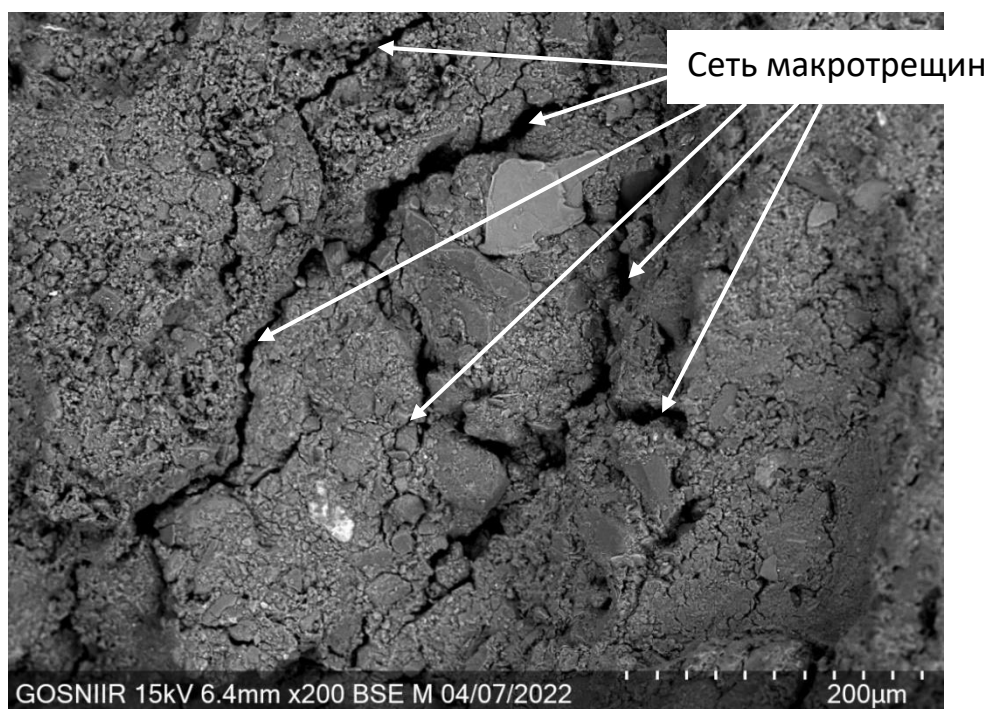


Рисунок 10 – Троице-Знаменская церковь в Лежнево. Образец кирпича северной стены с глубины 38 см. Увеличение 200х.

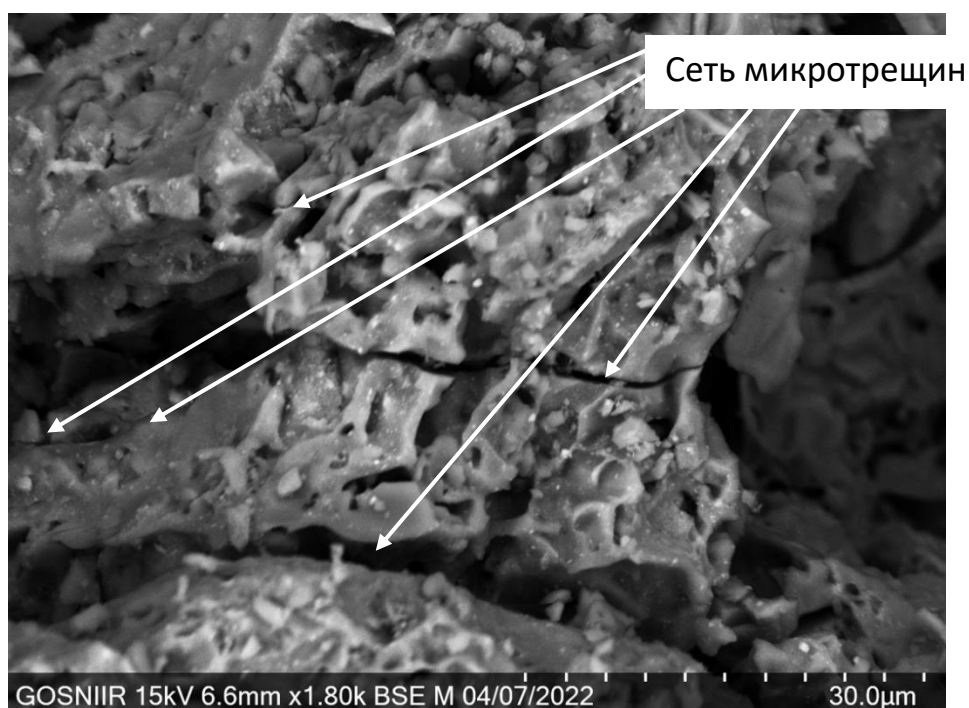


Рисунок 11 – Троице-Знаменская церковь в Лежнево. Тот же образец кирпича с увеличением 1800х

Таблица 5 – Распределение солей в материалах контрольных сечений церкви Николы Мокрого на высоте 0,1 – 0,2 м от уровня пола

№ сечения	глубина отбора проб (см)				
	0,5 - 4	8 - 12	23 - 28	38 - 45	56 - 60
№ 2	2,5	3,5	5,3	4,0	7,2
№ 4	3,5	2,6	2,4	4,5	1,8
№ 5	5,1	3,7	0,5	1,8	0,7
№ 6	4,8	4,0	3,7	2,9	1,1
№ 7	8,2	3,5	2,5	5,7	3,5
№ 8	1,2	5,4	3,4	1,1	8,6
№ 10	3,4	3,9	1,5	1,0	-
№ 11	8,4	4,5	0,6	5,9	16,6
№ 13	2,2	2,3	3,0	2,0	5,4
№ 14	2,0	1,7	1,2	0,7	6,9
№ 15	6,0	3,6	3,2	3,0	6,0
№ 17	3,7	5,4	2,6	0,8	1,8
№ 19	2,7	2,0	3,2	4,9	1,6
№ 20	0,8	1,2	0,8	0,1	0,4

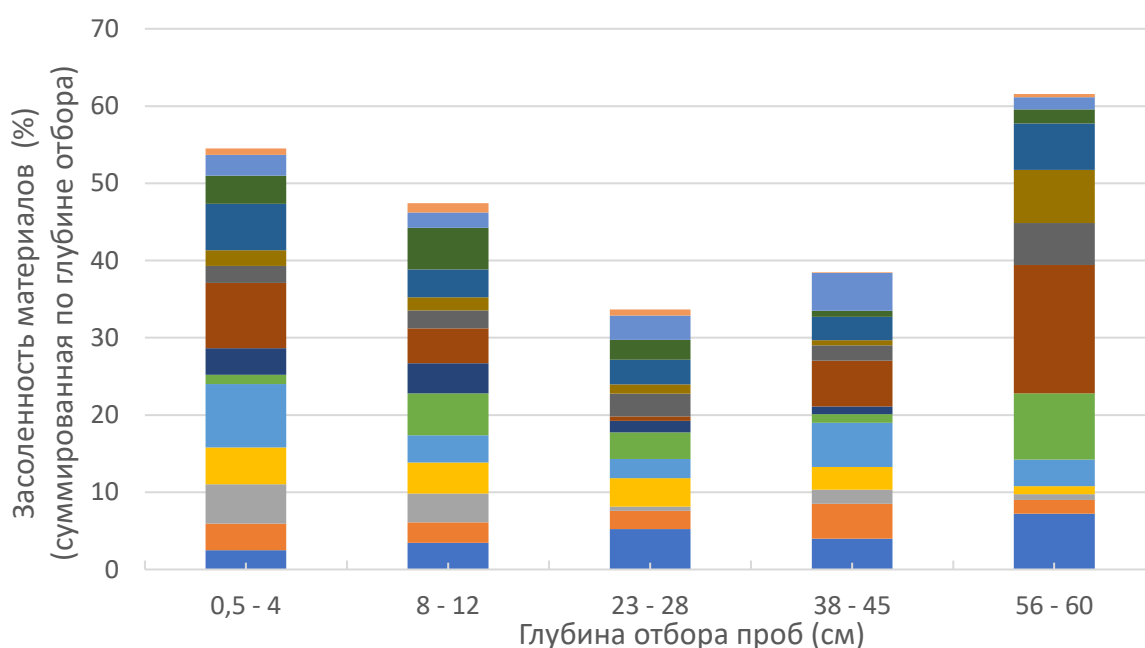


Рисунок 12 – Суммарное распределение солей в материалах контрольных сечений церкви Николы Мокрого на высоте 0,1 – 0,2 м от уровня пола

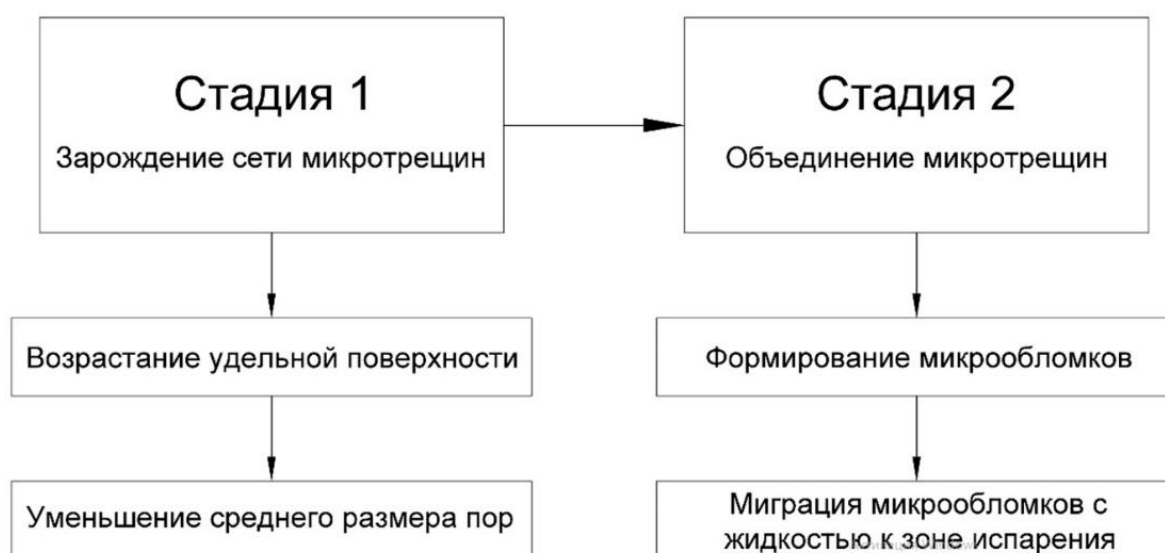


Рисунок 13 – Изменение порового пространства в процессе развития разрушения материала

Стадия 1. Зарождение сети микротрещин. В районе внутренних зон испарения зарождается и развивается сеть микротрещин. На этой стадии на данном конкретном участке наблюдается уменьшение среднего размера пор и увеличение удельной поверхности.

Стадия 2. Объединение микротрещин с формированием микрообломков. Дальнейшее развитие и последующее объединение сети микротрещин на отдельных участках приводит к образованию микрообломков материалов, их вымыванию и миграции вместе с жидкостью по направлению к близлежащей зоне испарения. На этой стадии происходит развитие внутренней неоднородности порового пространства материалов. Структура разрушенных участков становится менее плотной с порами увеличенного размера, как результат вымывания части материала в виде микрообломков. Здесь наблюдается снижение прочностных характеристик. Параллельно с этим, приповерхностный слой материала, где продолжается процесс аккумуляции примесей, становится более плотным с развитой микропористостью. При сужении пор до нанометрической области на этих участках начинается разрушение и развитие всех указанных выше этапов деструкции.

При оценке свойств материалов по микрокернам фиксация второй стадии деструкции возможна, в основном, только косвенно, по формату образцов, так как при прохождении пробоотборником ослабленных зон (микрообломков), материал крошится. Таким образом, само по себе уменьшение длины керна является показателем увеличения количества зон, относящихся ко второй стадии деструкции.

Показано, что развитие процесса деструкции связано с изначальным существованием и дальнейшим развитием внутри системы кладки зон испарения. В связи с этим процессы деструкции могут параллельно развиваться во всем объеме конструкции, ограничиваясь лишь участками, недостижимыми для прямого увлажнения. В условиях системы кладки процесс деструкции носит саморазвивающийся характер, решающим фактором в котором служит доступ жидкой среды. С этой точки зрения любой участок кладки, долговременно

пребывающий в условиях постоянного или периодического увлажнения, будет неизбежно (в той или иной степени) разделен по физическим свойствам материалов. Изменения свойств определяются расположением макротрещин и пустот, формирующих внутренние зоны испарения.

Пограничные слои внутренних зон испарения уплотнены примесями. Материалы за зонами уплотнения могут находиться в трех состояниях: до начала разрушения, когда физико-механические свойства материалов приближаются к изначальным; пронизанные сетью микротрещин, когда процессы деструкции активно развиваются, однако материалы сохраняют свои прочностные характеристики близкими к изначальным; пронизанные макротрещинами, где уже может проявиться снижение прочностных характеристик материалов.

Это чередование физических свойств явилось основанием для характеристики состояния материалов и положено в основу разработки критерия – индекса деструкции (I_d) материалов конструкций ОКН:

$$I_d = ((G_a/P_{cm} * 100) * N_m) / I_{wl} \quad (1)$$

где: G_a – расчетное значение среднего веса, P_{cm} – расчетный вес кернa длиной 1 см, N_m – доля твердой части материала пробы, I_{wl} – индекс весовых потерь. G_a – рассчитывается по следующей формуле:

$$G_a = (G_t + G_{ref}) / 2 \quad (2)$$

где G_t – средний вес образца по всей пробе, G_{ref} – средний вес образца по трем референтным (как правило, наиболее крупным) образцам, используемым для лабораторных исследований.

P_{cm} – рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{cm} = \frac{\pi d^2}{4} * \rho_b \quad (3)$$

где d – диаметр кернa, ρ_b – кажущаяся плотность материала. N_m – рассчитывается по следующей формуле:

$$N_m = \frac{P_{пр}}{l_{пр} * P_{cm}} \quad (4)$$

где $P_{пр}$ – вес сухой пробы, $l_{пр}$ – диапазон отбора пробы.

Для получения индекса весовых потерь I_{wl} значения финишных весовых потерь образцов WL_f индексируются следующим образом: при WL_f в диапазоне 0,1 – 0,2% – индекс весовых потерь $I_{wl} = 1$; при WL_f в диапазоне 0,3 – 0,5% – индекс весовых потерь $I_{wl} = 1,1$; при WL_f в диапазоне 0,6 – 0,8% – индекс весовых потерь $I_{wl} = 1,2$; при WL_f в диапазоне 0,9 – 1,1% – индекс весовых потерь $I_{wl} = 1,3$; при WL_f в диапазоне 1,2 – 1,4% – индекс весовых потерь $I_{wl} = 1,4$. Весовые потери 1,5% и выше принимаются для расчетов без изменения. Иными словами, индекс весовых потерь (I_{wl}) в этом случае принимает значения WL_f .

Для практической интерпретации результатов нами предложена следующая условная градуировка.

- Удовлетворительное состояние – $I_d > 15$.

- Промежуточное состояние (отдельные признаки деструкции) – $I_d = 10-15$.
- Деструктированное состояние – $I_d < 10$.

Для оценки валидности предлагаемого индекса деструкции было проведено его сопоставление с параметрами прочности, скорости звуковой волны, морозостойкости и среднего размера пор.

Прочность на одноосное сжатие. Результаты показали значимую корреляцию индекса деструкции с показателями прочности, как для образцов кирпича, так и для раствора. Корреляционная зависимость (коэффициент Пирсона) составляла от 0,5 до 0,9.

Морозостойкость. Корреляции с показателями морозного разрушения не наблюдалось. По всей вероятности, это связано с тем, что процесс морозного разрушения в реальных условиях проходит иначе, чем в лабораторных условиях. Кроме того, реакция на замораживания воды зависит от размеров образцов. Сочетания факторов микроразмеров, с невозможностью соблюдения единого типоразмера, может влиять на полученные результаты. Данное направление требует дополнительных исследований.

Ультразвуковое исследование. Для образцов кирпича корреляция со скоростью волны практически отсутствовала. Для раствора корреляция составила 0,64 – 0,82.

Средний размер пор. Для образцов кирпича корреляция составила от 0,6 до 0,74. Для образцов раствора явная корреляция с размером пор отсутствовала.

Результаты, полученные в главе 5 позволили выявить механизм разрушения материалов систем кладочного типа, подверженного долговременному увлажнению и разработать методику косвенной оценки состояния материалов на основе критерия – индекса деструкции I_d .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа отечественных и зарубежных исследований и нормативной документации выявлено отсутствие единого методического подхода к оценке основных факторов, определяющих долговечность пористых материалов конструкций объектов культурного наследия.
2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика оценки и интерпретации распределения влаги в материалах каменной кладки исторических конструкций ОКН, позволяющая оценивать не только результаты лабораторных исследований, но и проводить оценку состояния материалов конструкций в натурных условиях.
3. На основе результатов экспериментальных и натурных исследований выявлены основные закономерности распределения влаги в материалах каменной кладки исторических конструкций ОКН. Показано, что характер распределения влаги в кладочных системах, в первую очередь, определяется не свойствами материалов, а развитой пустотностью между ними.
4. Выявлены основные тенденции изменения свойств пористой структуры исследуемых материалов, заключающиеся в уменьшении среднего размера пор, увеличении удельной площади поверхности и

сорбционных характеристик, позволяющие оценить влияние влажности материалов каменной кладки на их физико-механические свойства.

5. Теоретически обоснован и предложен для практического использования критерий – индекс деструкции (I_d), пригодный для квалификационной оценки состояния материалов исторической каменной кладки при работе с разработанной малоинвазивной методикой отбора проб (микрокернов). Для практического использования предложена градация индекса деструкции, позволяющая квалифицировать состояние материалов по трем категориям:
 - Удовлетворительное состояние – $I_d > 15$.
 - Промежуточное состояние (отдельные признаки деструкции) – $I_d = 10–15$.
 - Деструктированное состояние – $I_d < 10$.
6. Результаты исследований учтены при внесении поправок в 8 главу (Исследование температурно-влажностного режима) ГОСТ 55567-2013 «Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования».
7. В настоящее время результаты работы используются при обследовании и оценке состояния памятников ОКН.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшего продолжения требуют исследования по следующим направлениям:

- Возможность учета сезонной динамики влажностного режима с возможностью фиксации годовых колебаний влажности без необходимости дополнительного сверления кладки.
- Использование данных на основании индекса деструкции отдельных материалов для оценки несущей способности каменной кладки в целом.
- Исследование влияния знакопеременных температур на разрушение материалов каменной кладки. Разработка методики исследования, пригодной для микрокернах материалов памятников ОКН.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Шейкин, Е. В. Закономерности распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия / Е. В. Шейкин, В. Ф. Степанова // Вестник НИЦ «Строительство». – 2025. – № 1 (44). – С. 84–100. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-84-100](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-84-100)

2. Шейкин, Е. В. Характер разрушения слоистых пористых материалов в конструкциях объектов культурного наследия / Е. В. Шейкин // Бетон и железобетон. – 2025. – № 2 (627). – С. 54–62. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62). EDN: RPQXZP

3. **Шейкин, Е. В.** Механизм разрушения слоистых материалов исторических конструкций объектов культурного наследия / Е. В. Шейкин, В. Ф. Степанова // Вестник НИЦ «Строительство». – 2025. – № 2 (45). – С. 122–134. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-122-134](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-122-134)

Другие публикации

4. Нормализация температурно-влажностного режима Рождественского собора Ферапонтова монастыря / Н. С. Краснощекова, С. Б. Куликов, Б. Т. Сизов, **Е. В. Шейкин**, Е. Н. Шелкова // АВОК. – 2004. – № 4. – С. 70-74.

5. Сизов, Б. Т. Примеры нормализации температурно-влажностного режима в музеях – памятниках архитектуры / Б. Т. Сизов, **Е. В. Шейкин** // Материалы научно-практической конференции «Музейная климатология – основа сохранения объектов культурного наследия». – Великий Новгород, 2011. – С. 40-48.

6. **Шейкин, Е. В.** Исследование влажностного режима конструкций в храме Софии Премудрости Божией в Средних Садовниках в Москве / Е. В. Шейкин // Реставрация и исследования памятников культуры. Выпуск 8. – Москва, 2015. – С. 249-258.

7. **Шейкин, Е. В.** «Исследование температурно-влажностного режима Смоленского собора Новодевичьего монастыря в 2013 году» / Е. В. Шейкин // Сохранение культурного наследия. Исследования и реставрация. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 427-434.

8. **Шейкин, Е. В.** Оценка влажности и структуры материалов конструкций памятников архитектуры методом отбора микрокернов. Перспективы применения / Е. В. Шейкин // Исследования в консервации культурного наследия. Международная научно-методическая конференция, посвященная 60-летию Государственного научно-исследовательского института реставрации : Тезисы и доклады. – Москва, 2017. – С. 79-80.

9. **Шейкин, Е. В.** Исследование влажностного режима конструкций памятников архитектуры методом отбора микрокернов / Е. В. Шейкин // Исследования в консервации культурного наследия : Материалы Международной научно-методической конференции. – Москва : ООО «Принт», 2019. – С. 287-302.

10. **Шейкин, Е. В.** Изменение микро- и макроструктурных характеристик исторических конструкций, находящихся в неблагоприятных влажностных условиях / Е. В. Шейкин // Сборник трудов VII Международного научно-практического Симпозиума "Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси". – Сергиев Посад : Свято-Троицкая Сергиева Лавра, 2020. – С. 177-189.

11. **Шейкин, Е. В.** Вопросы диагностики и интерпретации влажностного состояния материалов исторических конструкций. Разница в подходах строительного и реставрационного направлений / Е. В. Шейкин // Реставрация и исследования памятников культуры : Выпуск 12. – Санкт-Петербург : Издательский дом «Коло». – С. 308-315.