

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«СТРОИТЕЛЬСТВО» (АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»)

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Степанова Валентина Федоровна



Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Обзор и анализ отечественной и зарубежной литературы по влиянию влажности материалов каменной кладки на их физико-механические свойства в конструкциях объектов культурного наследия	12
1.1. Уязвимость пористых материалов к воздействию влаги	12
1.2. Изменения физических свойств пористых материалов под воздействием влаги	20
1.3. Об исследовании и подходе к оценке состояния материалов каменной кладки конструкций ОКН	27
1.4. Выводы по 1 главе	38
Глава 2. Используемые материалы и методы исследования	40
2.1. Особенности отбора проб из конструкций ОКН.....	40
2.2. Разработка методов лабораторных исследований	47
2.3. Обработка результатов	55
2.4. Выводы по 2 главе	60
Глава 3. Разработка подхода к определению схемы участков отбора проб материалов конструкций ОКН	61
3.1. Критерии для определения участков отбора проб	61
3.2. Количество участков отбора проб в плане здания.....	68
3.3. Количество участков отбора проб по глубине и высоте конструкций	71
3.4. Выводы по 3 главе	79
Глава 4. Анализ и интерпретация данных результатов обследования состояния материалов конструкций ОКН	80
4.1. Влажностные характеристики материалов	80
4.2. Сорбционные характеристики материалов	92
4.3. Физические свойства материалов	99
4.4. Структурно-механические характеристики материалов	100

4.5. Выводы по 4 главе	108
Глава 5. Изменение физико-механических свойств материалов в зависимости от распределения влаги в каменной кладке конструкций ОКН	109
5.1. Особенности распределения влаги в материалах каменной кладки исторических конструкций	110
5.2. Корреляция пустотности с участками рассогласованности направлений изменения влажности и размера пор	117
5.3. Общая характеристика физических свойств пористого пространства исследованных материалов	121
5.4. Сопоставление физических свойств исследуемых материалов со свойствами материалов по литературным источникам	126
5.5. Трансформация микроструктуры материалов каменной кладки исторических конструкций объектов культурного наследия. Выявление механизма разрушения	137
5.6. Взаимосвязь структурно-механических характеристик с физическими свойствами и параметрами влажности	155
5.7. Индекс деструкции	159
5.8. Выводы по 5 главе	163
Заключение	165
Список литературы	167
Приложение А	204

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Большинство исследований, касающихся механизмов разрушения пористых материалов от циклического увлажнения связано с однородными структурами. Практически отсутствуют исследования, касающиеся механизмов разрушения систем из 2-ух и более компонентов, подверженных периодическому увлажнению в течение десятков, а то и сотен лет. Связано это, прежде всего, с ограниченной доступностью материалов для исследований, поскольку конструкции длительной эксплуатации за рубежом и в России находятся в статусе памятников и защищены законом об охране объектов культурного наследия (ОКН).

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 и своевременным.

Степень разработанности темы. Вопросы уязвимости и долговечности пористых материалов исследовали P. Hudec, G. G. Litvan, S. J. Rigbey, M. Demarco, J. Ruedrich, H. Stück, M. Kaneuji, W. D. Robertson, S. Rassel, M. Maage, G. C. Robinson, B. K. Moh'd, M. Keppert, B. F Miglio, B. K. Mohammad, A. R. Punuru, R. Rossi-Manaresi, A. Tucci, S. Ordóñez, D. Benavente, S. Yu, C. Oguchi, A. Ahmad, S. Simon, E. Molina, R.L. Blaine, J. H. Kung, P. Nieminen, M. Romu, N. Matsuoka, A. Bourgès, T. Nicholson, G. Cultrone, O. Buj, J. Gisbert, P. Vazquez, L. Germinario, Á. Török, М. К. Гальперина, Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер, В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, В. Т. Ерофеев, Д. Ю. Желдаков, В. А. Шаманов.

Вопросы трансформации пористой системы материалов исследовали D. Camuffo, K. Beck, C. Thomachot-Schneider, S. Rescic, E.D. Pittman, C. Cardell, L. D. Marco Castaño, C. Noiriel, R. Hendrickx, E. Colas, M. F. La Russa, M. Labus, J. Bochen,

M. Koniorczyk, C. Walbert, M. Hu, R. T. Stull, J. Ingham, D. Hoffmann, S. R. Koroth, A. Bracka, Z. Rusin, B. D. Fahey, D. F. Dagesse, A. Wetzel, A. G. Einsele, A. K. Navarre-Sitchler, D. Jeannette, C. Rodriguez-Navarro, E. Doehne, E. T. Mohamad, C. Cardell, J. Rodriguez-Gordilli, E. Sebastián, B. Middendorf, G. M. E. Kamh, R. Přikryl, H. Jia, W. Xiang, M. Krautblatter, T. Topal, B. Sözmen, H. Kukko, M. Bellanger, J. M. Remy, Li Dejian, W. Guilian, H. Liqiang, J. Li, R. Fort, S. Raneri, G. Barone, C. Walbert, Y. Tang, J. Zhang, A. Kaczmarek, M. Wesółowska.

Натурными исследованиями материалов исторических объектов занимались B. H. Vos, G. Mason, C. Franzen, P. W. Mirwald, C. Hall, W.D. Hoff, R. J. Pender, G. Massari, I. Massari, N. Ashurst, S. Garcia-Morales, A. Palomo, L. Binda, T. Squarcina, P. Trotman, K. Agyekum, S. Godts, R. Hayen, H. De Clercq, P. B. Lourenco, R. van Hees, F. Fernandes, B. Lubelli, S. N. Pratiwi, R. Vecchiattini, A. A. Halim, S. N. Harun, Y. Hamid, A. Sardella, P. De Nuntiis, C. Giosuè, A. Bonazza, F. Tittarelli, D. Capitani, N. Proietti, M. Gobbino, E. B. MØller, S. J. L'Anson, A. Hola, R. Agliata, E. Rirsch, Z. Zhang, D. D'Agostino, K. Van Balen, J. Mateus, G. Baronio, P. Cardiano, G. Cultrone, I. Sidraba, E. Sebastian, E. Verstrynge, M. Sklodowski, V. Bosiljkov, M. Uranjek, R. Žarnić, V. Bokan-Bosiljkov, S. Gizzi, F. Sandrolini, E. Franzoni, T. Vogel, J. Dušek, M. Dohnal, M. Sněhota, P. Bison, G. Cadelano, L. Capineri, E. Rosina, A. Sansonetti, N. Harmati, Ž. Jakšić, M. Trivunic, V. Milovanovic, Б. Т. Сизов, А. В. Улыбин, С. В. Зубков, С. А. Старцев, М. К. Ищук, В. Т. Гроздов, М. П. Емельянов, Ю. Г. Богущкий, В. В. Белов, В. Н. Деркач, Р. Б. Орлович, В. В. Инчик, А. М. Крыгина.

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, как с точки зрения методики исследований, так и с точки зрения поднимаемых вопросов.

Рабочая гипотеза. Трансформация пористой структуры материалов каменной кладки конструкций ОКН при циклическом воздействии на них влаги, в том числе с учетом знакопеременных и отрицательных 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. Обследовано более 3000 образцов материалов.

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 заявленной цели поставлены 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 отобранных из реальных конструкций ОКН образцов, 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 материала 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, лабораторных исследований современных строительных материалов, элементах теории капиллярности, сушки, адсорбции, массопереноса, солевого и морозного разрушения, долговечности и уязвимости пористых материалов. При выполнении экспериментальных исследований применялись традиционные методы по ГОСТ, частично адаптированные и переработанные автором с учетом специфики используемых образцов.

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 научного обследования конструкций ОКН по разработанной методике с выдачей заключений о физико-механических свойствах 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 работы послужили основой для проведения исследований 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 и т.д.

На основе результатов исследования автором в 2019 году были внесены поправки 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. Согласно сформулированной цели работы, ее научной новизне, установленной теоретической и практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.5 «Строительные материалы и изделия», по пункту 11 «Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации» и по пункту 17 «Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий».

Публикации. Материалы диссертационного исследования были изложены в 11 публикациях в научных журналах и сборниках материалов конференций, в том числе 3 работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных

журналов, утвержденном 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 рисунков и 12 таблиц.

Глава 1. Обзор и анализ отечественной и зарубежной литературы по влиянию циклического увлажнения пористых материалов на их физико-механические свойства

В данной главе рассматриваются проблемы уязвимости и изменения физических свойств пористых материалов под воздействием влаги, анализируются различные подходы к оценке изменения свойств материалов каменной кладки конструкций объектов культурного наследия (ОКН).

1.1. Уязвимость пористых материалов к воздействию влаги

Необходимость прогнозирования поведения пористых материалов под воздействием циклического увлажнения вызвала многочисленные исследования, направленные на выявление зависимости интенсивности развития процессов деструкции от свойств пористой системы. Первые отдельные исследования относятся еще к началу XX в [189; 331], однако планомерная тенденция началась в 70-х годах XX века и продолжается до сих пор.

Большинство исследователей сходится на том, что основную роль в вопросе долговечности играют особенности порового пространства материалов, прежде всего, открытая пористость и размер пор. Пористость выходит на передний план в том случае, если она менее 5–10% или более 40% [91; 92; 255; 259]. В первом случае материалы рассматриваются как относительно непористые, в результате чего их проницаемость для жидкости сводится к минимуму. Во втором случае проницаемость настолько велика, что жидкости практически не задерживаются в материале, что позволяет нивелировать возникающие напряжения. В качестве примера можно обратиться к практике применения Маастрихтского известняка, который, обладая пористостью выше 40%, существует в условиях циклического воздействия влаги без ухудшения состояния [307]. При пористости выше 10%, но менее 40% на первый план выходит параметр размера пор, и основная часть

исследований посвящена влиянию различных аспектов данной характеристики на сопротивляемость материалов процессам деструкции.

Р. Hudec в своих исследованиях [194–199] поведения горных пород при переменном замораживании показывает, что в менее долговечных материалах количество незамерзающей влаги в 2–3 раза больше, чем в более долговечных материалах. Рассматривая связь между незамерзающей и сорбционной влагой, автор предлагает оценивать количество первой по гигроскопичности материала, т. е. по количеству адсорбированной влаги при 100% относительной влажности. Материалы с большим количеством адсорбционной воды имеют высокий коэффициент влажностного расширения, что при многократно повторяющихся циклах увлажнения и высыхания приводит к усталостным деформациям. При отрицательных температурах адсорбционная вода остается в переохлажденном состоянии, а поскольку давление насыщенного пара переохлажденной воды выше давления насыщенного пара льда, то она выталкивается в более крупные капиллярные поры, где замерзает [242–245]. Таким образом, в капиллярных порах возникает эффект расширения за счет постоянно увеличивающегося количества льда, тогда как в сорбционных порах, наоборот, создается эффект сжатия, за счет отсасывания сорбционной влаги. Чем больше сорбционной влаги, тем сильнее эффект влажностного и морозного расширения / сжатия и, соответственно, тем менее долговечными оказываются породы. Согласно разработанной Р. Hudec'ом градации материалы, имеющие более 35–40% адсорбционной влаги, не являются долговечными.

S. J. Rigbey, подтверждая идеи Р. Hudec'а, делает важное добавление, касающееся того, что количество адсорбционной влаги полностью зависит от размеров пор, в соответствие с чем, уязвимость материалов к разрушению есть, по сути, функция распределения пор по размерам [308]. Однако какие-либо конкретные значения размеров пор S. J. Rigbey не приводит. Позднее, выводы Р. Hudec'а и S. J. Rigbey подтверждаются экспериментами М. Ondrášik'а и М. Kopecký [281]. Авторы исследуют две группы камней, одну с крупными порами, в которых вода замерзает около 0°C, вторую – с большим количеством микропор (менее 0,1

мкм), в которых вода замерзает ниже 0°C . После проведенных испытаний на морозостойкость интенсивность разрушения материалов достаточно четко коррелировала с количеством микропор. Следует отметить, что в отличие от предыдущих исследований, здесь приводится численное ранжирование уязвимых материалов, проходящее по границе 0,1 мкм.

Новое развитие идеи Р. Нудес'а получают в исследованиях немецких ученых, базирующихся на теории поверхностных сил Б. В. Дерягина [26]. Группа М. Demarco [143], рассматривая снижение прочности песчаников при увлажнении, обнаруживает явную корреляцию между снижением прочности и количеством глинистых минералов и микропор. Авторы высказывают гипотезу, согласно которой снижение прочности связано не только с присутствием в породах глинистых минералов, но также с расклинивающим давлением внутри микропор менее 0,1 мкм. В исследовании группы J. Ruedrich'а, также проведенное на песчаниках [320], показывается, что влажностное набухание исследуемых образцов происходит не только при увлажнении жидкостью, но и при возрастании относительной влажности, и что график расширения сопоставим с графиком сорбционного увлажнения. Выявив линейную корреляцию между интенсивностью набухания и микропористостью, авторы делают уже более определенный вывод, что не только глинистые минералы, но и степень микропористости, ответственны за коэффициент влажностного расширения и долговечность материалов. Группа Н. Stück'а демонстрирует линейную корреляцию между расширением, сорбцией и количеством микропор менее 0,1 мкм [350]. Авторы указывают, что исследуемые песчаники обладают лишь очень незначительным количеством глинистых минералов, вследствие чего за влажностное расширение, в данном случае, отвечают только микропоры менее 0,1 мкм. В последующие годы к аналогичному выводу об определяющей роли пор менее 0,1 мкм исследователи приходят и на примере других горных пород [294; 334; 374].

Группа М. Kaneuji обнаруживает обратную корреляцию между пористостью, размерами пор и морозостойкостью образцов известняка, сланца, и кирпича [215;

216]. На основании результатов выводится индекс долговечности EDF (Expected Durability Factor):

$$EDF = 0,579 / PV + 6,12 * MD + 3,04, \quad (1.1)$$

где PV – объем пор,

MD – медианный размер пор.

Согласно градации авторов, значения EDF менее 40 свидетельствуют о низкой морозостойкости материалов, однако привязка значений индекса к размерам пор отсутствует.

Дальнейшее развитие этого направления разделяется на две ветви. Первая ветвь связана с выделением уязвимого диапазона микронного размера. W. D. Robertson использует петлю гистерезиса ртутной порометрии для выявления бутылочных пор, показывая, что именно сочетание мелких (менее 5 мкм) и крупных (более 5 мкм) пор усиливает уязвимость материалов к солевой деструкции [311]. Автор указывает, что несмотря на относительно случайный, с его точки зрения, характер ранжирования микропор, как пор менее 5 мкм, сделанный до него S. Rassel'ом, данное значение хорошо коррелирует с полученными результатами по долговечности исследуемых известняков. М. Мааге проводит серию испытаний кирпича на морозостойкость, по результатам которых делает вывод относительно существования линейной корреляции между морозостойкостью кирпича и количеством пор более 3 мкм [253]. Одновременно с М. Мааге к аналогичному выводу приходит G. C. Robinson, однако в качестве границы между долговечными и слабыми кирпичами принимается размер пор в 1 мкм [312]. Группа В. К. Moh'd исследует возможность использования параметров пористости (P), коэффициента насыщения (C_{sat}) и микропористости менее 5 мкм (P_m) для оценки долговечности известняка [263]. Они рассматривают несколько комбинаций данных параметров – $P_m * C_{sat}$; $P_m^{C_{sat}}$; $(P_m^{C_{sat}})^{0,5}$ – и приходят к выводу, что ни одна из них не дает надежной корреляции. В результате авторы удаляют из формулы параметр микропористости, после чего финальный вариант индекса выглядит как: $[P^{C_{sat}}]^{0,5}$. Следует отметить, что позднее индексы долговечности В. К. Moh'd были протестированы исследованиями группы М. Kerppert с той поправкой, что в

качестве микропор были приняты поры менее 1 мкм. В результате указанной поправки все три варианта дают очень хорошую корреляцию с весовыми потерями образцов в процессе солевой деструкции [218]. Группы В. F Miglio [259] и В. К. Mohammad'a [262] разрабатывают формулы индексов долговечности на основании тех же параметров, но с небольшими вариациями. Первые используют индекс $A_{112}: C_{sat} + 0,5P_m$, вторые «модифицированную микропористость»: $P * P_m$. По мнению авторов оба индекса позволяют вполне надежно предсказывать долговечность исследуемых материалов.

Вторая ветвь направлений исследований выводит на первый план поры нанометрического размера. Немаловажную роль здесь, помимо прочего, сыграло то обстоятельство, что в 1985 году в Германии выходит учебник физики, в котором глава по влажности принадлежит перу Н. Klopfer'a, определяющего термин «микропоры» – как поры размером менее 0,1 мкм, на том основании, что в них возможно образование капиллярного конденсата [220]. Важность этого обстоятельства заключается в том, что с этого момента многие исследователи используют термин «микропоры» как поры менее 0,1 мкм, противопоставляя тем самым, классификацию Н. Klopfer'a классической классификации IUPAC, где под «микропорами» понимаются поры менее 2 нм. На определяющее значение пор нанометрического размера в вопросах долговечности указывалось и в более ранних работах [221; 232], однако после 1985 года исследование их влияния приобрело характер нового направления.

Группа А. R. Punuri, основываясь на результатах М. Kaneuji и W. D. Robertson'a проводит исследование известняка Сфинкса [298]. Используя петлю гистерезиса для выявления размера бутылочных пор, авторы выделяют три диапазона пор: менее 0,5 мкм, 0,5–5 мкм и более 5 мкм и выводят индекс долговечности DF (durability factor):

$$DF = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3, \quad (1.2)$$

где V_1 , V_2 и V_3 – процентные объемы пор в диапазонах пор > 5 , $0,5-5$ и $< 0,5$ мкм соответственно,

A_1 , A_2 и A_3 – константы со значениями 1,2338, 2,6220 и 0,9841 соответственно.

Однако ранжирование по значениям не приводится, что существенно снижает ценность данного индекса деструкции с точки зрения практического использования.

R. Rossi-Manaresi и A. Tucci, исследуя поведение натуральных камней в процессе солевой деструкции, ранжируют поры по классам, рассчитывая примерное давление для каждого класса и выводят, что высокое давление кристаллов соли возникает в камнях, где микропоры сочетаются с крупными порами [319]. Используя ту же методику, группа S. Ordóñez'a проводит исследование солевого выветривания известняков, по результатам которого выводится индекс уязвимости на основании пористости и распределения пор по размерам [282; 283]. Сопоставление значений полученного индекса с весовыми потерями образцов после солевой деструкции позволяет авторам сделать вывод, что основным фактором долговечности исследуемых материалов является степень микропористости, т. е. количество пор менее 0,1 мкм. Последующая работа группы D. Benavente, подтверждая вывод относительно микропористости, добавляет в индекс долговечности характеристики прочности [91].

В исследовании S. Yu и C. Oguchi [379] демонстрируется, что высокая уязвимость материалов связана с сочетанием двух диапазонов пор: капиллярных от 0,1 до 5 мкм, отвечающих за интенсивность поглощения камнем жидкости и микропор менее 0,1 мкм, отвечающих за интенсивность кристаллизационного давления. По результатам исследования выводится индекс деструкции SSI (salt susceptibility index):

$$SSI = (I_{Pc} + I_{Pm0,1}) * (P_{m5} / P_c), \quad (1.3)$$

где I_{Pc} = индекс пористости,

$I_{Pm0,1}$ = индекс микропористости пор менее 0,1 мкм,

P_c = общая пористость,

P_{m5} = количество пор менее 5 мкм.

Согласно приведенному ранжированию, материалы с SSI выше 4 относятся к уязвимым, менее 4 – к долговечным. Результаты исследования были апробированы в [212; 213; 356].

В исследовании группы А. Ahmad'а [76], авторы показывают, что весовые потери камней очень хорошо коррелируют ($r = 0,98$) с произведением микропористости менее 0,1 мкм ($P_{m0,1}$) и водопоглощением (W_{abs}): $P_{m0,1} \cdot W_{abs}$.

Несколько особняком стоят работы групп Е. Molina и М.К. Гальпериной. Е. Molina исследует солевую деструкцию натуральных камней и приходит к выводу, что их уязвимость зависит от количества пор в диапазоне 0,1–1 мкм [265]. М. К. Гальперина исследует морозостойкость керамики и приходит к выводу, что опасными порами следует считать поры в диапазоне от 0,1 до 10 мкм [9; 10].

Часть исследований указывают на явную корреляцию уязвимости материалов с их удельной площадью поверхности [91; 93; 94; 128; 241; 301]. Впервые об этом пишет группа R. L. Blaine [101]. G. G. Litvan проводит исследование долговечности кирпича и показывает, что существует явная корреляция между морозостойкостью и величиной внутренней поверхности [243; 244]. Автор пишет, что значения удельной площади нельзя считать абсолютным показателем, однако кирпичи с $S_{уд}$ менее 0,5 м²/г не проявили каких-либо признаков деструкции после тестов. С другой стороны, кирпичи с $S_{уд}$ более 1,25 м²/г оказались уязвимыми и были в той или иной степени разрушены. J. H. Kung на основании исследования канадских кирпичей делает вывод, что удельная поверхность может служить абсолютным показателем долговечности только в рамках материалов, изготовленных из одного сырья и по одной технологии [227; 228]. При оценке кирпича разных производств, помимо удельной поверхности, необходимо использовать дополнительные критерии. P. Nieminen и M. Romu показывают, что удельная поверхность может служить показателем интенсивности деструкции кирпича [278]. Согласно их результатам $S_{уд}$ недеструктированного кирпича не превышает 1 м²/г, тогда как $S_{уд}$ деструктированных кирпичей составляет 1,65–4,5 м²/г. N. Matsuoka, исследуя морозное разрушение горных пород, приходит к выводу о достаточно слабой корреляции между

морозостойкостью и удельной поверхностью [258]. А. Bourgès демонстрирует, что величина удельной поверхности позволяет оценить количество мельчайших пор и микротрещин размером около нескольких нанометров [106].

Отдельно следует выделить направление, оценивающее уязвимость пористых материалов по степени их водопроницаемости. В [136] на основании интенсивности разрушения известняков, делается вывод о важности сочетания микро- и макропор. При этом основная опасность микропор менее 0,1 мкм, по мнению авторов, заключается в снижении проницаемости материала и задерживании жидкости, что приводит к возникновению внутренних напряжений. В [264] выводится, что основа долговечности породы – хорошая проницаемость, приводящая к быстрому удалению воды после намокания.

Из приведенного анализа литературы, посвященной вопросам уязвимости пористых материалов для воздействия механизмов разрушения, можно видеть, что большинство исследователей видят характеристики пористой системы и, в частности, мелкие поры, основной причиной низкой долговечности. При этом, результаты большинства работ, вне зависимости от направлений, показывают, что наиболее опасным диапазоном являются микропоры по терминологии Н. Klopfer'a, т. е. поры менее 0,1 мкм.

Стоит отметить также несколько работ, результаты которых показывают обратную тенденцию, согласно которой макропористые материалы оказываются более подверженными процессам деструкции. В работе Т. Nicholson'a, посвященной связи характеристик порового пространства известняков с механизмами разрушения [276], помимо прочего, показывается, что повышение уязвимости к солевой деструкции достаточно хорошо коррелирует с уменьшением микропористости. В исследовании группы G. Cultrone делается вывод, что более крупнопористые кирпичи, обожженные при более высокой температуре, более уязвимы к морозному разрушению, чем более мелкопористые кирпичи, обожженные при менее высокой температуре. Объясняется данный эффект уменьшением проницаемости первых в результате более высокой степени остекловывания [139]. В работе О. Вуј и J. Gisbert сравнивается поведение образцов

3%-ной пористости с мелкими и 10%-ной пористости с крупными порами [115]. На основании бóльшей долговечности образцов 3%-ной пористости делается вывод и том, что более мелкие поры способствуют повышению долговечности. Учитывая, что в данном случае основополагающую роль играет именно пористость, полученные результаты затруднительно считать корректными. В публикации группы Р. Vazquez'а утверждается, что камни с преобладающим диапазоном пор 0,1–1 мкм оказываются менее уязвимыми к солям, чем более крупнопористые камни [366]. Авторы считают, что уязвимость крупнопористых камней связана с более высокой пористостью и, как следствие, с более интенсивным подсосом жидкости. В работе L. Germinario и Á. Török'а по вулканическим туфам микропористые камни оказываются более долговечными [169]. Но и здесь пористость камней с микропорами существенно выше, что не позволяет провести убедительной корреляции. Учитывая тот факт, что роль размера пор оценивается, прежде всего, при относительно равном объеме порового пространства, то выводы бóльшей части последних исследований представляются не вполне корректными.

В отечественной литературе существуют исследования, акцентирующие внимание на влиянии на долговечность керамики фазового состава и химической коррозии. Группа В. З. Абдрахимова в своих исследованиях называет причиной долговечности ряда исторических кирпичей формирование в них в процессе обжига муллита, анортита и волластонита [1–4]. В. А. Шаманов называет причиной низкой морозостойкости современного кирпича – отсутствие в структуре керамического черепка силлиманита и муллита [64]. Д. Ю. Желдаков и В. Т. Ерофеев указывают в качестве основы механизма разрушения кирпича реакции между гидроксидом кальция, поступающим из раствора, и оксидами кремния и алюминия с образованием волластонита и однокальциевого алюмината [27–31].

1.2. Изменение физических свойств пористых материалов под воздействием влаги

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросу трансформации свойств пористой системы под действием механизмов разрушения, полученные результаты носят разнородный, а иногда и противоречивый, характер.

Часть исследователей обнаруживают изменения, в основном, в поверхностных слоях материалов. D. Camuffo утверждает [118], что пористость материалов кладки со временем изменяется, в особенности в поверхностном слое. Однако это утверждение не сопровождается какими-либо экспериментальными доказательствами. К. Векк оценивает изменения свойств известняка под действием циклов увлажнения / высыхания и не обнаруживает каких-либо явных изменений пористой системы в центральной части материала, тогда как в поверхностном слое фиксирует существенное возрастание микропористости [87]. С. Thomachot демонстрирует значительное уплотнение поверхностного слоя материала в результате перемещения с водой и осаждения в зоне испарения частиц глины [357]. S. Rescic подтверждает существенное возрастание микропористости в поверхностном слое известняков [307].

Однако, большинство исследователей, все же, не разделяет исследуемые образцы на слои и рассматривают происходящие изменения в совокупном объеме материала. В [291] показывается, что явление микропористости связано с формированием, так называемой, «вторичной» пористости, т. е. пористости, возникшей в результате изменения свойств материалов в процессе деструкции, который был соотнесен с процессом зарождения и развития сети микротрещин. С этим выводом согласуются результаты большинства последующих исследований. В [276] заявляется, что любой процесс деструкции начинается с зарождения и развития микротрещин, объединение которых на поздних этапах деструкции может привести к развитию пустотности. Группа С. Cardell'a демонстрирует, что разрушение связано с модификацией пористой системы камня [122], и что в микропористых однородных камнях процесс разрушения носит единый характер.

На первом этапе формируются микротрещины, объединяющиеся на втором этапе в единую сеть, параллельную поверхности. На третьем этапе разрастание микротрещин приводит к общему увеличению пористости. С этим выводом полностью согласуются исследования группы D. Benavente, где показывается, что солевое выветривание материала начинается с формирования и развития сети микротрещин [89]. Группа L. D. Marco Castaño утверждает, что и морозное выветривание вызывает зарождение и развитие сети микротрещин, однако увеличение пористости при этом крайне незначительно и, в среднем, не превышает 1,5% [254]. Группа C. Noiriél подтверждает, что проявление солевой деструкции начинается с микротрещин, постепенно развивающихся до макротрещин [280].

В [187] показывается, что соли, откладываясь в порах приводят к уменьшению их размеров, однако общая проницаемость материала при этом не снижается, поскольку процесс солевой деструкции сопровождается образованием микротрещин, что компенсирует эффект уменьшения размера пор от солей. Про компенсационный характер микротрещин пишет в своей работе и E. Colas, показывая, что несмотря на существенное возрастание количества макропор 20-100 мкм поры менее 1 мкм остаются без изменения вследствие возникновения развитой сети микротрещин [128]. Сходный процесс описывает и группа M. F. La Russa, проводящая исследование по солевому разрушению известняковых пород с подробным отслеживанием каждого из диапазонов пор. Согласно их результатам основным показателем деструкции является формирование сети микротрещин и микропор. В финальной стадии процесса деструкции объединение микротрещин приводит к возрастанию количества макропор [323]. В исследовании M. Labus, и J. Bochen, посвященном разрушению песчаников, показывается, что увеличение пористости, в большинстве случаев, является следствием развития сети микротрещин. Разрушение материалов сопровождается увеличением удельной поверхности и среднего размера пор. Кроме того, указывается на то, что модификация микроструктуры материалов увеличивает их уязвимость для дальнейшего разрушения [230]. Группа M. Koniorczyk демонстрирует, что описанный характер развития процесса солевой деструкции подходит и для

цементных материалов, где также финальное увеличение пористости происходит в результате развития микротрещин [223]. В [193; 372] показывается, что процесс, как морозного, так и солевого разрушений, начинается с формирования микротрещин, постепенно переходящих в макротрещины и возрастание пористости.

Некоторые исследователи отмечают возрастающее влияние коэффициента насыщения в процессе морозного разрушения [203; 352]. Однако здесь необходимо уточнить, что коэффициент насыщения (отношение количества воды, поглощенной материалом путем капиллярного подсоса к максимальному насыщению) определяется мелкими порами. В [227; 228] указывается, что коэффициент насыщения прямо пропорционален количеству промежуточных пор кирпича (0,1–1 мкм), и в целом, большие поры снижают коэффициент насыщения, тогда как малые поры увеличивают его. D. Hoffmann пишет, что коэффициент насыщения уменьшается при снижении микропористости (менее 5 мкм) [190]. S. R. Koroth в своей работе показывает, что коэффициент насыщения возрастает с увеличением количества пор менее 3 мкм [224]. E. Molina, подтверждая общую тенденцию, снижает границу до 2 мкм [264]. A. Bracka и Z. Rusin подтверждают, что коэффициент насыщения уменьшается с возрастанием количества крупных пор, но не приводят каких-либо конкретных значений [107]. Из приведенного видно, что зафиксированная исследователями тенденция к возрастанию коэффициента насыщения в процессе деструкции, фактически, отражает отмеченную выше тенденцию к возрастанию микротрещин и микропор.

Ряд исследователей отмечает, что зарождение и рост микротрещиноватости может приводить к снижению среднего размера пор, а также, соответственно, к увеличению удельной поверхности. B. D. Fahey и D. F. Dagesse пишут, что циклы замораживания / оттаивания влияют на возрастание удельной поверхности пород [156]. P. Nieminen и M. Romu, в своем докладе в Дублине, заявляют, что сорбционные свойства и удельная поверхность деструктированных кирпичей существенно возрастают [278]. Группа польских исследователей демонстрирует возрастание удельной поверхности у выветренных известняков [225]. В работе А.

Wetzel, и A. G. Einsele по глинистым породам [377] сделан вывод относительно возрастания у выветренных материалов пористости и удельной поверхности. Позднее, абсолютно такой же вывод группа A. K. Navarre-Sitchler делает относительно изменения пористой системы изверженных пород [271].

D. Jeannette предлагает оценивать степень деструкции материалов по изменению пористой структуры, утверждая, что в процессе разрушения пористость материалов возрастает, а размер пор уменьшается [208]. С. Rodriguez-Navarro и E. Doehne демонстрируют уменьшение размеров пор материалов после солевого выветривания, в результате осаждения солей [315]. Наибольший эффект достигается при использовании хлорида натрия, минимальный – при использовании сульфата натрия. Следует отметить, что данный вывод нельзя считать полностью корректным, поскольку уменьшение размера пор при осаждении солей является обратимым, и после промывки образцов водой количество кристаллов соли может существенно измениться.

В работе С. Thomachot и D. Jeannette, посвященной морозному разрушению песчаников, показывается, что в процессе выветривания количество мелких пор (менее 2 мкм) возрастает, а количество крупных пор уменьшается [355]. В [364] анализируется поведение различных пород в процессе выветривания и делается вывод, что для всех материалов характерно возрастание количества микропор, появление которых связано с образованием в результате выветривания глинистых минералов. Они заполняют поровое пространство, тем самым увеличивая удельную поверхность и уменьшая размер пор.

Согласно исследованиям группы малазийских исследователей, химическое и физическое разрушение существенно изменяет свойства песчаника: чем выше степень выветривания, тем значительно увеличивается пористость и степень микротрещиноватости [261]. С этим выводом согласна и группа испанских исследователей, заявляющая на примере известняка, что в процессе солевого выветривания удельная поверхность и количество микропор и микротрещин явно возрастает, тогда как количество макропор более 10 мкм явно уменьшается [123]. Подобную же тенденцию по увеличению в процессе выветривания количества

микротрещин и мелких пор фиксируют G. Cultrone и E. Sebastián для композитных систем [137]. Н. Siedel, в своем исследовании альвеолярного выветривания песчаников, показывает, что на выветренных участках наблюдается увеличение удельной поверхности и микропористости [335]. Группа чешских ученых, по результатам исследования солевого разрушения песчаников, приходит к выводу, что увеличение микропористости и уменьшение среднего размера пор связано с формированием вторичной пористости и является общей тенденцией [73].

А. Ahmad, S. Stefan Simon и B. Middendorf докладывают на XII международном конгрессе по разрушению и консервации камня, что солевая деструкция сопровождается образованием сети микротрещин, возрастанием количества микропор менее 0,1 мкм и удельной поверхности [76]. В дальнейшем, к аналогичному выводу приходит еще ряд исследователей [212; 213; 239; 265; 347]. Группа G. M. E. Kamh'a и C. T. Oguchi, в одной из своих работ [214], делает важное дополнение, касающееся того, что развитие микропористости существенно повышает уязвимость камня к разрушению, и после этапа увеличения количества микропор начинается завершающий этап – расширения и разрушения порового пространства.

Некоторая часть исследователей в качестве основных критериев изменения структуры материалов, выделяет возрастание пористости [209; 297]. Т. Toral и В. Sözmen, кроме того, предлагают по изменению пористости и водопоглощения определять степень разрушения [361].

Ряд исследователей отмечает, что наряду с возрастанием микропористости может наблюдаться и возрастание макропористости. Н. Kukko демонстрирует, что в процессе выветривания количество пор бетона менее 0,05 мкм сначала возрастает, а затем снижается [226]. Группа французских ученых при исследовании влияния морозного разрушения на карбонатные породы [88] приходит к выводу, что в мультимодальной системе в процессе деструкции возникает, фактически, новая система пор – микротрещин. Унимодальная система, наоборот, демонстрирует увеличение размера пор и возрастание открытой пористости. Группа китайских исследователей показала, что пористая структура горных пород

существенно изменяется после циклов увлажнения / высыхания. Авторы выделяют несколько параллельных противоположных процессов: образование множества новых микропор на поверхности частиц; перераспределение глиняных частиц в результате их перемещения водой и отложения в поровых каналах, в результате чего пространство пор и движение воды блокируется; часть поверхностных зерен отрываются из-за вымывания водой, в результате чего размер пор возрастает [142]. Другой группой китайских ученых показано, что в процессе разрушения песчаника под действием чистой воды микропористость материалов возрастает, а под действием солевых растворов микропористость уменьшается и наблюдается возрастание пористости и значительное расширение имеющихся пор. При этом в обоих случаях начало процесса деструкции связано с формированием микротрещин [237].

Чешские исследователи, анализируя состояние горных пород, подвергавшихся солевому выветриванию, делают вывод о возрастании пористости и среднего размера пор материалов [296]. М. Labus, исследуя известняки из исторической конструкции, показывает, что в разрушенной части камня количество макропор (1,8–20 мкм) увеличивается [229]. Группа R. Fort выпускает исследование разрушения плотных известняков с пористостью 3%, с выводом о незначительном увеличении макропор более 5 мкм [161]. S. Raneri пишет, что выветривание известняков сопровождается уменьшением объема пор и количества микропор, а также возрастанием макропористости и коэффициента насыщения. Следует отметить, что, в отличие от большинства аналогичных работ, выводы сделаны на обессоленных образцах [304]. Группа G. Barone исследует изменения свойств строительных камней, отмечая, что солевая деструкция сопровождается развитием сети микро- и макротрещин, уменьшением пористости и возрастанием размера пор [85]. С. Walbert в работе по морозному разрушению известняков заявляет, что поры менее 1 мкм подвергаются расширению в процессе деструкции, соответственно, средний размер пор возрастает [373]. Аналогичные результаты получены при исследовании древних стен из китайского голубого кирпича, где

показано возрастание макропористости поверхностного слоя лицевых кирпичей [354].

Последующие исследования песчаников показали [238; 383], что под воздействием морозного разрушения в поровом пространстве материалов происходит параллельно два независимых процесса: формирование новых микропор и расширение уже существующих. В [211] авторы приходят к выводу, что материалы меняют свои свойства под воздействием влаги. Отмечается уменьшение пористости и количества микропор менее 0,1 мкм, а также увеличение количества пор в диапазоне 0,1–3 мкм. Количество пор более 3 мкм остается без изменения.

Из приведенного анализа можно видеть, что о каком-либо согласии результатов исследований можно говорить только относительно начального этапа деструкции, связанного с зарождением сетей микротрещин. Относительно дальнейшего развития свойств пористой системы материалов мнения исследователей расходятся.

1.3. Об исследовании и подходе к оценке состояния материалов каменной кладки конструкций ОКН

В анализе существующих исследований состояния материалов исторических конструкций памятников архитектуры можно выделить три базовых направления. Исследование влажностного режима без учета микроструктурных характеристик, исследование физических свойств материалов без учета влажностного режима и различные попытки их совместного изучения.

Исследование влажностного режима имеет наиболее долгую историю, вследствие очевидности негативного влияния влаги на долговечность материалов. Зарождение методической базы в направлении оценки влажностного режима материалов конструкций объектов культурного наследия следует отнести ко второй половине 60-х годов XX столетия. Принятие в 1964 году Венецианской хартии дало активный импульс для формирования и развития различных

национальных и межнациональных групп реставраторов. Интенсивное общение специалистов разных направлений выявило определенные лакуны в понимании специалистами, работающими в сфере реставрации, физических причин тех или иных явлений. В частности В. Н. Vos в своей работе так описывал эти проблемы [371]: «Во время конференции в Риме (1967 год), организованной Международным советом по памятникам и достопримечательностям (Icomos) и Международным центром по изучению сохранения и реставрации культурных ценностей, у автора была возможность установить, что существует большая пропасть между теми, кто занимается реставрацией древних исторических памятников, и теми учеными, которые работают в области влагопереноса». Данную работу можно считать первой попыткой преодоления этой пропасти и первым шагом в направлении применения физики в вопросах исследования памятников архитектуры. Автор излагает основы теории капиллярности и практического расчета высоты поднятия влаги не только в одиночном капилляре, но и в реальных конструкциях. Впервые постулируется тот факт, что высота подсоса есть функция скорости испарения влаги с поверхности и толщины стены. В работе другого исследователя, G. Mason'a [256], особое внимание уделяется капиллярному подсосу. Указывается, что высота фронта влажности возрастает со временем, чуть ли не в семь раз за сто лет. Автор предполагает две причины подобного явления: уменьшение скорости испарения влаги вследствие блокировки поверхностных пор солями и увеличение проницаемости раствора за счет его частичного вымывания водой. В ряде дальнейших работ влага выделяется как ключевой фактор разрушения [163], уделяется внимание ее перераспределению под влиянием градиента влажности [178; 181]. Однако, все эти работы не предлагают никакой практической методики, позволяющей проводить исследования на реальных объектах. R. J. Pender [289] указывает на тот факт, что в реальных конструкциях основным фактором влияния на распределение влажности будет не разница в свойствах материалов и не градиенты влажности, а зоны испарения, возникающие на границе между материалами и приводящие к накоплению на этих участках солей. Опять же,

несмотря на определяющую важность данного положения, методика практического определения зон испарения внутри стены не обсуждается.

Практикующие реставраторы – исследователи G. Massari и I. Massari, на основании огромного практического опыта, впервые продемонстрировали системный подход к вопросам исследования и корректировок влажностного режима исторических конструкций и предложили практические решения, в частности, путем отбор порошковых проб на влажность глубиной до 15–20 см. Сопоставление проб с разной глубины позволяет отличить капиллярную влагу от конденсационной [257].

Отечественным практикующим реставратором – исследователем Б. Т. Сизовым впервые формулируется понятие «нормальной» влажности материала на основе природы влаги [50]. Под нормальной влажностью понимается максимальная сорбционная влага, удерживаемая материалом в условиях околоремонтного давления водяного пара. Более того, понятие нормальной влажности впервые связывается с изменением микроструктуры исторических материалов, поскольку указывается, что сорбционные характеристики не являются постоянными и возрастают со временем. Это наглядно демонстрирует, что нормальная влажность не может быть одинаковой не только для материалов разных памятников, но даже и для материалов одного и того же памятника, но находящихся в разных условиях существования.

N. Ashurst [80] впервые предпринимает попытку разработки комплексной методики оценки причин разрушения материалов. Во главу угла автор ставит неверные рекомендации в результате неверной диагностики, которые могут не только не улучшить, но даже ухудшить состояние памятника. В работе поднимается вопрос о невозможности использования методик исследования строительных материалов для исторических конструкций, поскольку каждый памятник требует собственного индивидуального решения на основании его состояния, а необдуманная попытка решения одной проблемы может усугубить состояние другой.

В работе испанских реставраторов S. Garcia-Morales и A. Palomo [167] на первый план выводится проблема определения природы влажности, для чего авторы предлагают отбирать твердые образцы материалов с поверхности, определять их естественную влажность и сопоставлять ее с влажностью сорбционной. При этом следует отметить, что сорбционная влага воспринимается исключительно как привнесенная солями; возможная трансформация собственной микроструктуры материалов, как и макроструктура кладки в целом, не рассматриваются. Таким образом впервые декларируется, что определение естественной влажности само по себе не является информативным, поскольку не позволяет сделать каких-либо значимых выводов.

Параллельно развивается и другое направление, связанное с отбором не твердых образцов, а порошков [99; 309]. Причиной этого, очевидно, была необходимость получения данных не только с поверхности, но и из глубины стены, однако вместе с тем была утрачена возможность анализа материала в его неразрушенном естественном состоянии. Опираясь на эти работы P. Trotman разрабатывает полноценную методику исследования влажностного режима на памятнике путем отбора порошковых проб на глубину до 80 мм и сравнения их естественной и сорбционной влажности [363]. Данную методику можно считать классической, поскольку она до сих пор является наиболее востребованной у исследователей [75; 171; 251; 295]. R. Vecchiattini указывает на существенную проблему данной методики, с которой он столкнулся при исследовании аббатства Сан Маттео в Генуе [367]. Высокая степень неоднородности материалов стен привела к тому, что при отборе проб на глубину до 15 см были получены порошки в виде смеси камня, кирпича разного вида, раствора и т. д. Все это существенно усложнило или сделало практически невозможной корректную интерпретацию полученных данных. К сожалению, автор ограничивается констатацией проблемы, без какой-либо попытки ее решения. В [177] позиционируется необходимость, помимо влажности порошковых проб определять степень засоления методом ионной хроматографии.

В [329] заявляется, что на данный момент полностью отсутствует научный подход и методика диагностики влажностного состояния конструкций. Авторы делают попытку расширить методическую базу путем проведения отбора не только порошков, позволяющих оценивать лишь влажностные параметры, но и твердых образцов, позволяющих исследовать физические свойства материалов. Однако в заключительных рекомендациях авторы указывают только пробы на влажность, тогда как исследования физических свойств не упоминаются вовсе. В работах [120; 266] показан метод комплексного исследования при помощи совмещения разрушающих и неразрушающих методов. Инфракрасная термография, ядерно-магнитная спектроскопия использовались в качестве предварительных для выявления участков, требующих лабораторного исследования. К сожалению, полученные образцы исследовались в лаборатории только на естественную влажность. В работе [233] впервые указывается, что различные покрытия и пропитки стен, в том числе паропроницаемые, существенно влияют на скорость испарения, способствуя увеличению высоты подсоса.

А. Нола, проводя обзор по методам определения влажности материалов исторических конструкций [191] указывает, что развитие практических методик исследования тормозится органами охраны памятников, поскольку все эти методики носят инвазивный характер. D. Samuffo рассматривает методику, изложенную в стандарте EN 16682–2017, разработанном специально для объектов культурного наследия [119]. Здесь озвучивается примерно та же проблема запретов свободного применения инвазивных методов на памятниках, но уже с позиции существующих стандартов. Противоположная точка зрения на этот своеобразный «конфликт» между корректностью решения задач и этичностью применения разрушающих методик на объектах ОКН дается в [74]. Авторы признают, что единственная возможность получить достоверные данные о свойствах материалов связаны с отбором проб. Однако, они придерживаются позиции, при которой вред для конструкций от отбора проб может оказаться бóльшим, чем вред от присутствия внутри стен влаги. Следует отметить, что диаметр сверла для отбора

проб у них, без объяснения причины, возрастает до 18–20 мм, что не может не вызывать методических вопросов.

С. Hall и W. D. Hoff впервые разрабатывают методику практического расчета интенсивности и высоты капиллярного подсоса на основании абсорбционной способности материалов и скорости испарения влаги с поверхности [179; 182]. Апробация методики проведена в работе английских исследователей E. Rirsch'a и Z. Zhang'a [310]. Авторы изготовили две модели кирпичной кладки, на современном цементном и историческом известковом растворах. Оценка проводилась экспериментальным способом при помощи отбора проб и расчетным способом по методу С. Hall и W. D. Hoff'a. Результаты показали, что высота фронта влажности и распределение влаги напрямую связана с размером пор материалов. Второй вывод работы касается методики расчета, которая показала отличное согласование с реальными данными. D. D'Agostino также успешно применяет методику С. Hall'a и W. D. Hoff'a для расчета сезонного колебания влажности в конструкциях собора в Лечче в Апулии [140]. К сожалению, для оценки валидности методики используются не лабораторные исследования образцов материалов, а визуальные данные, что существенно снижает ценность полученных результатов.

Серия трагических событий в южной Европе существенно повлияла на ход и направление исследовательской инженерной мысли. День 17 марта 1989 года ознаменовался неожиданным обрушением центральной башни Павии (Италия), повлекшим за собой гибель четырех человек. Последовавшая за башней Павии череда похожих обрушений показала неслучайность этого явления. В 1990 году рухнула церковь Святого Мартина в Керкстене (Бельгия), в 1993 году – колокольня Святой Магдалены в Гохе (Германия), в 1996 году частично обрушились собор Святого Николая в Ното и колокольня собора Иоанна Крестителя в Монце (Италия), в 2006 году обрушились колокольня церкви Святого Виллиброрда в Мелдерте и девичья башня в Зихеме, оба памятника расположены в Бельгии. Все эти события произвели шоковое впечатление на реставрационное сообщество, поскольку ни одно из рухнувших зданий не числилось аварийным.

Последовавшие расследования повлекли за собой создание международного проекта по выявлению причин разрушения исторических конструкций, одним из результатов которых явилось создание комплексной методики исследования и оценки степени разрушения исторических конструкций [84]. Для выявления связи между причинами разрушения и состоянием материалов предлагается выполнять полный комплекс лабораторных исследований свойств материалов. В выводах, в частности, подчеркивается, что все механизмы разрушения связаны с доступом в материалы влаги, однако, в качестве практической методики вновь предлагается порошковое сверление как наиболее подходящий для памятников архитектуры вследствие своего малоинвазивного «щадящего» характера. Проблемы с неоднородностью материалов и вопросы интерпретации результатов не затрагиваются вовсе. Таким образом, в качестве основной заслуги проекта, по всей вероятности, можно считать лишь теоретический постулат о необходимости определения физических свойств материалов. Характерно, что в изложенном виде данная методика применялась нечасто. В [97; 98] вообще не упоминаются пробы на влажность. В этих работах для исследования морфологии материалов стены в разрезе автор рекомендует использовать эндоскопические исследования, для чего в стене необходимо выполнить отверстие диаметром 80 (!) мм. Полученные керны при этом никак не используются, поскольку позиционируются как слишком деструктированные для лабораторных испытаний. Более подробно причина непригодности кернов для испытаний не освещается. Еще один отличительный момент заключается в том, что пробы для определения свойств рекомендуется отбирать из сухих участков, не подверженных воздействию дождя, по всей видимости, с целью получить данные о характеристиках, максимально приближенных к изначальным. Тем самым, вопрос о потенциальной возможности определения степени трансформации микроструктуры материалов в результате процессов деструкции даже не ставится.

В исследовании состояния конструкций монастыря Сан-Филиппо-ди-Фрагала во Фраццоне в Сицилии [124] авторы проводят подробное исследование физических свойств материалов на базе 12 поверхностных кирпичей. В качестве

выводов делаются предположения относительно источников глины, температуры обжига, датах производства и т.п. Таким образом, все полученные результаты связываются с изначальными свойствами материалов. Влажность и связанные с ней механизмы разрушения, а также потенциально возможные изменения микроструктуры не рассматриваются. Исключение составляют анализы на содержание солей, показавшие минимальные значения. Следует отметить, что и места отбора проб, преимущественно на высоте более 1 метра, изначально не подразумевали возможность анализа влажностных характеристик.

При исследовании конструкций «Треугольного Бастиона» в Риге [139] авторы провели полный комплекс лабораторных исследований на 16 образцах целого кирпича с выводами относительно происхождения исходных материалов, температуры обжига, состава, геометрии порового пространства, прочности и долговечности. По словам авторов, количество образцов было ограничено с целью минимизации ущерба для памятника. При этом характеристики влажности и засоленности определялись отдельными 9 пробами, отобранными в виде порошков с глубины 2,2 см. Анализ влажностного режима и выводы относительно причин увлажнения и механизмов разрушения заключаются в паре предложений и носят весьма условный характер.

В большой работе международной группы исследователей под руководством L. Binda, посвященной характеру разрушения материалов исторических конструкций [96] обобщаются все произошедшие за последнее время обрушения и рассматриваются их возможные причины. Помимо прочего обосновывается важность знания морфологии материалов стены из-за активного развития пустот и неравномерности распределения нагрузок. Показывается, что вначале существования здания основной вес приходится на материалы центральной части кладки (забутовку), однако, со временем из-за развития пустот наблюдается постепенное перераспределение нагрузок, в результате которого основной вес перемещается на наружные версты.

Е. Verstrynge в своей работе [368] пишет, что историческая кладка является неоднородной неизотропной трехслойной системой, с регулярной кладкой по

краям (наружная и внутренняя версты) и менее регулярным, а иногда и хаотичным внутренним заполнением (забутовка). Соотношение размеров верст и забутовки, а также характер их перевязки может существенно варьироваться. Разное качество изготовления забутовки и наружных слоев материалов, недостаточность перевязки, первичная ползучесть кладки до полной карбонизации раствора – все эти факторы приводят к неравномерному перераспределению нагрузки, снижению связности материалов и возникновению сети трещин. Все конструкции подвержены накоплению повреждений и ухудшению состояния с течением времени, и миграция влаги является одним из ключевых факторов в этом отношении, способствующая, в частности, снижению связности материалов, вследствие увеличивая деформацию ползучести. При этом, развитие процессов деструкции происходит нелинейно, в результате чего кажущееся устойчивое поведение может смениться внезапной катастрофой, вследствие развития усталостных напряжений. Для оценки состояния материалов автор рекомендует лабораторные исследования твердых образцов диаметром 40–100 мм.

Многообещающим начинанием, с точки зрения создания общей методики, представляется серия статей польского исследователя М. Sklodowski, где он предлагает методику исследования механических свойств материалов на основе микрокернов, диаметром 6–8 мм [336–341]. Автор указывает, что все виды исследований должны проводиться на одном образце, вследствие чего методически неверно превращать в порошок материал, а выгоднее сохранять его неразрушенным, используя не обычное, а трубчатое сверло. К сожалению, М. Sklodowski ограничил отбор проб участками, предназначенными для установки оборудования и только поверхностным слоем. А сами исследования, в конечном счете, свелись только к определению прочностных свойств. Это существенно сократило потенциально очень широкие возможности самой идеи использования микрокернов. Возможно, именно поэтому, метод так и не получил никакого дальнейшего практического развития.

Немало работ было посвящено и попыткам разработать методику, учитывающую совместное влияние, как влажностных, так и структурных

характеристик [104; 170; 324; 325; 326; 370]. В этих работах, едва ли не впервые, применительно к полевым исследованиям, заявляется о прямой связи влажности с микроструктурой и, соответственно, о необходимости оценки не только влажностных, но и физических свойств каждого образца. Однако, на практике образцы для тех и других вновь отбираются по отдельности, поскольку влажность первоначально определяется по классическим канонам на порошковых образцах. При этом, проведенные исследования показывают, что свойства порошка существенно отличаются от свойств изначального неразрушенного материала, как по влагосодержанию, так и по удельной поверхности. Таким образом, результаты, полученные по порошку, могут не соответствовать реальности. Необходимость оценки влажностных характеристик не на порошковых пробах, а на твердых образцах является ключевым выводом данных работ. Основываясь на нем, авторы, независимо друг от друга, предлагают в полученных после отбора порошковых образцов отверстиях располагать твердые образцы материалов с известными свойствами, и после достижения равновесия с окружающими материалами оценивать произошедшие изменения в лабораторных условиях.

В [100; 318; 327] заявляется, что влага важна не сама по себе, а как возможная причина изменений структурных характеристик материалов. В связи с этим указывается на необходимость определения не только влажностных, но и структурных характеристик, касающихся свойств пористого пространства, а также степени засоленности материалов. Однако в практической части работы исследователи ограничиваются определением только влажностных характеристик, не представляя никаких методических наработок относительно оценки структурных параметров. В исследовании здания бывшей Торговой академии в Воеводине [185], подвергающегося разрушению из-за постоянного увлажнения грунтовыми водами, проводится попытка определения физических свойств материалов для оценки их состояния после многолетнего воздействия влаги. Однако в качестве образцов используются целые кирпичи, что неизбежно ограничивает их количество. Авторы сообщают о шести кирпичах, взятых с разной высоты в подвале и первом этаже, что, учитывая высокую степень неоднородности

исторических конструкций, неизбежно приводит к вопросу о статистической достоверности полученных результатов. Тем не менее следует отметить, что это единственная работа, где влажностные и структурные характеристики оцениваются на одних и тех же образцах.

Отдельно следует рассмотреть существующие работы по исследованию старых зданий и исторических материалов отечественными исследователями. Б. Т. Сизов, практикующий инженер – реставратор, исследовал возможности неразрушающих методик для оценки температурно-влажностного режима памятников архитектуры [50–53]. Группа А. В. Улыбина, исследуя методы определения прочностных характеристик материалов существующих конструкций приходит к выводу, что оптимальным вариантом является отбор кернов 58–60 мм [54, 57, 58]. Аналогичное мнение высказывает и В. Т. Гроздов [23]. В работах [7; 24; 46] предлагается увеличить диаметр керна до 200 мм с тем, чтобы получить единицу кладки с прослойкой раствора и, тем самым, получить возможность оценки работы материалов не по отдельности, а в совокупности. В. В. Инчик также рассчитывает фактическую прочность кладки исторических конструкций, но не кернов, а целиковых кирпичей. Однако, он не ограничивается прочностными характеристиками, принимая также во внимание влажностные параметры и солевую деструкцию, делая вывод, что с увеличением объема открытых пор и содержания растворимых солей прочность кирпича уменьшается [32, 33]. Кроме вопросов прочности группа Улыбина разбирает также вопросы контроля влажности материалов кладки, делая выводы о необходимости сочетания неразрушающих и разрушающих методов [59]. К сожалению, объединения методик оценки влажностных и прочностных характеристик не проводится. Группа А. М. Крыгиной рассматривает случаи разрушения материалов кладки вследствие переувлажнения и долгосрочных протечек. Однако, какие-либо иные параметры, кроме влажности, не рассматриваются. Методика отбора проб и оценки влажностных параметров материалов не указываются [45]. Группа М. К. Ищука исследует влияние эксплуатационных факторов, в первую очередь, температурных, на трещинообразование лицевого слоя кладки [35–41]. Однако испытания, в

основном, проводятся на экспериментальных образцах в лабораторных условиях, исследования реальных объектов ограничиваются визуальными наблюдениями за характером развития трещин.

Из представленного можно видеть, что если зарубежные исследования, в основном, разрабатывали теоретические аспекты методики оценки состояния материалов конструкций, то отечественные исследования, больше акцентировали внимание на практической стороне вопроса.

1.4. Выводы по 1 главе

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал:

- Результаты многочисленных исследований трансформаций физико-механических свойств пористых материалов конструкций объектов культурного наследия, как в лабораторных, так и натурных условиях, противоречивы, в оценке причин деградации.
- Единый методический подход к исследованию основных факторов – физических свойств и структурно-механических характеристик – определяющих долговечность материалов отсутствует.
- Исследование физических свойств и структурно-механических характеристик материалов без учета фактора влаги не имеет смысла, поскольку именно влага несет ответственность за их трансформацию.
- Исследование влажностных характеристик без учета физических свойств материалов также не имеет смысла, поскольку именно особенности пористой системы определяют интенсивность влияния влаги.

По результатам аналитического обзора отечественной и зарубежной литературы сформулированы рабочая гипотеза и цель работы.

Рабочая гипотеза: Трансформация пористой структуры материалов каменной кладки конструкций ОКН при циклическом воздействии на них влаги 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.

Цель работы: Оценка влияния долговременного циклического увлажнения материалов каменной кладки на трансформацию их физико-механических свойств в конструкциях объектов культурного наследия.

Цель работы определила дальнейшие задачи исследования:

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 отобранных из реальных конструкций ОКН образцов, 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 материала для оценки состояния материалов исторической кладки конструкций ОКН, подверженных длительному циклическому увлажнению, путем сопоставления физических и структурно-механических свойств материалов.

Глава 2. Используемые материалы и методы исследований

В процессе проведения исследований в работе использовались только материалы, отобранные из каменной кладки конструкций объектов культурного наследия. Искусственных образцов, изготовленных в лабораторных условиях, не применялось. При выполнении экспериментальных исследований применялись традиционные гостовские методы, частично адаптированные и переработанные автором с учетом специфики используемых образцов.

Учитывая выводы первой главы, а также охранный статус объектов культурного назначения, в основу разработки методики исследования были заложены следующие принципы:

1. Минимально возможная инвазивность для минимизации последствий вмешательства.
2. Достаточность образцов исследуемых материалов для достижения минимальной статистической достоверности полученных результатов.
3. Единство образцов, т. е. возможность проведения всех видов лабораторных испытаний на одних и тех же образцах.
4. Необходимость градации образцов, как в плане объекта, так и по высоте и глубине конструкций.
5. Необходимость градации образцов по материалам, разные пробы – разные материалы.

За основу была принята классическая методика отбора «порошковых» проб на влажность, однако вместо сплошного сверла использовалось полое трубчатое с целью получения неразрушенного материала [68], по образцу микрокернов М. Sklodowski.

2.1. Особенности отбора проб из конструкций ОКН

Учитывая охранный статус объектов исследования, первоочередной задачей являлась разработка методики отбора проб. Первые пробоотборники были сделаны

в 2008 году на основе тонкостенной латунной трубки диаметром 8 мм с тонким алмазным напылением, практически не уменьшавшим внутренний размер. Диаметр керна в такой трубке составлял примерно 6 мм, тогда как диаметр отверстия в стене не превышал 8,2 мм (Рисунок 2.1а). Длина первых пробоотборников составляла 5 и 10 см, что позволяло отбирать из одного отверстия две пробы на глубину до 7–8 см.

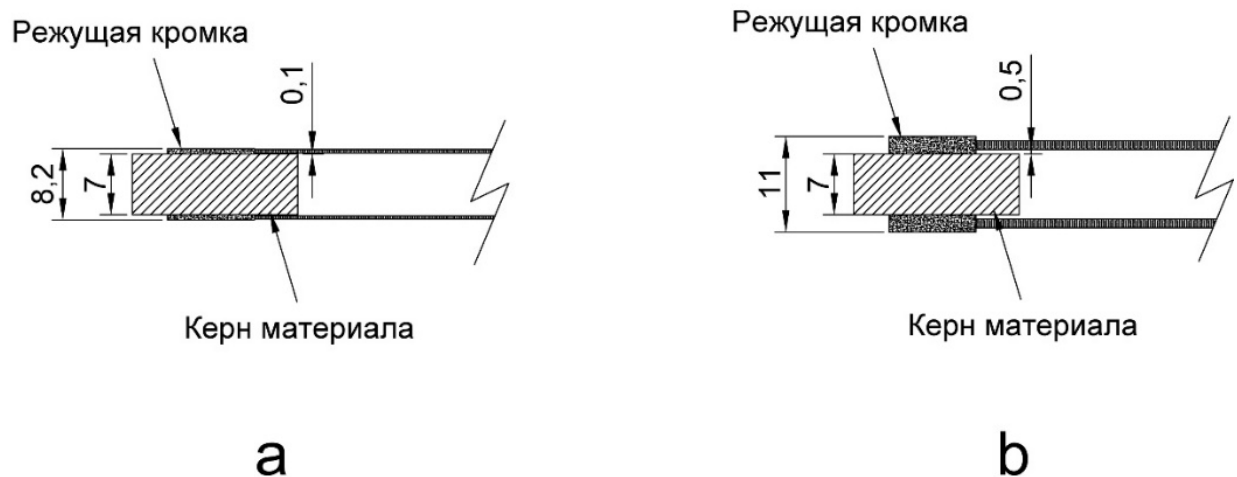


Рисунок 2.1 – Схема пробоотборников. Первый пробный (а) и финальный (б) варианты.

Опробование, проведенное на белом камне подвальных конструкций усадьбы Лопухиных и кирпиче церкви Благовещения Ферапонтовского монастыря, выявило следующее. Тонкого алмазного напыления оказалось вполне достаточно для отбора мягких материалов – сверло входило практически без усилий. Гораздо сложнее оказалось извлечь керн из трубки, поскольку мокрый известняк настолько прочно «вставал в распор», что не помогало даже механическое «выбивание» при помощи металлического стержня и молотка. В данном отношении минимальная толщины режущей кромки сыграла отрицательную роль, поскольку практически отсутствовал люфт (0,1 мм) между пробой и внутренней поверхностью трубки. Однако прочный кирпич Благовещенской церкви оказался пробоотборнику не под силу. Тонкое алмазное напыление стачивалось за несколько сантиметров прохода. Вторая проблема выяснилась при попытке увеличить длину пробоотборника и,

соответственно, глубину отбора проб. Тонкостенные трубки не выдерживали нагрузки и деформировались в процессе сверления даже на мягких материалах.

После серии экспериментов было принято решение изготавливать пробоотборники из толстостенных латунных трубок диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм. Алмазная крошка также была заменена на более крупную с тем, чтобы можно было отбирать не только мягкие, но и твердые породы, нередко встречающиеся в забутке. Кроме того, при использовании более толстого слоя напыления создавался более ощутимый люфт в 0,5 мм между керном и внутренней поверхностью трубки, что должно было несколько облегчить процесс извлечения проб. В результате внешний диаметр сверла вырос до 11 мм, а внутренний сократился до 7 мм (Рисунок 2.1b).

Твердые неразрушенные образцы обладают значительно меньшей поверхностью для испарения, чем порошки, и, кроме того, находятся внутри металлической трубки. Оба фактора существенно снижают вероятность влажностных потерь в процессе отбора проб в сравнении с обычным сверлом и порошками. Тем не менее, возникающий значительный перегрев в процессе отбора проб образцов, а также долгий процесс извлечения керна из трубки нежелателен. В отличие от обычных материалов алмаз меньше нагревается при высоких скоростях, поэтому для отбора проб была выбрана дрель Festool PDC 18/4 с максимальной скоростью 3800 оборотов в минуту. При сверлении используется минимальный нажим на дрель, необходимый лишь для обеспечения требуемого положения пробоотборника. Проведенные эксперименты показали, что один подход (сверления) с заявленными характеристиками (скорость 3800 оборотов в минуту, минимальный нажим) не должен продолжаться дольше 8–10 сек. С одной стороны этого времени достаточно для отбора части пробы, с другой стороны нагрев пробоотборника и, соответственно, материала, остается ограниченным. В теплое время года на сложных участках целесообразно использовать параллельно несколько сверл каждой длины, чтобы металл успевал полностью остыть между подходами.

Не менее важным этапом является извлечение материала из трубки. В оптимальном режиме продолжительность временного отрезка между завершением сверления и упаковка пробы в бюксе не должна превышать 50–60 сек. В большинстве случаев керны проще извлекать через обратную сторону сверла, противоположную режущей кромке. В особенности это важно для материалов, находящихся в околонушенном состоянии, которые имеют обыкновение «вставать в распор», после чего их, не всегда удается выбить даже с применением механических средств (металлического стержня и молотка). В связи с этим важно было ограничить процесс отбора не только по времени, но и по количеству пройденного материала за один подход. Чем более влажный и мягкий материал, тем меньше материала следует отбирать за один раз. Сухой материал, как правило, не требует подобных ограничений, поскольку извлекается без всяких проблем простым постукиванием по пробоотборнику металлическим стержнем.

Особое внимание необходимо было уделять чистоте внутренних поверхностей пробоотборника, поскольку остатки материала обладают достаточно высокой адгезией и моментально «прилипают» к стенкам, усложняя или делая практически невозможным извлечение следующих проб. С этой целью после каждого подхода пробоотборник тщательно очищался с внутренней стороны, сначала металлическим прутком с заусенцем, а затем металлическим ершиком.

Первое время, при использовании тонкостенных трубок, глубина отбора проб не превышала 7–8 см. Такие пробы охватывали только поверхностные слои стены, что существенно снижало возможности интерпретации результатов, поскольку не было возможности оценить изменения влажности материалов по глубине. При переходе на толстостенные трубки появилась возможность значительного увеличения глубины прохода стены. Опыт исследований показал, что для возможности корректной интерпретации результатов необходимо знать распределение показателей не менее чем на половину толщины конструкции в случае относительно тонких стен (70–80 см в поперечном сечении) и не менее 60–65 см в случае более массивных стен (более метра в поперечном сечении) (Рисунок 2.2). Подобная глубина охватывает, как наружную версту, так и забутовку, что

позволяет сделать достаточно представительную раскладку по требуемым характеристикам всех структурообразующих элементов конструкции.



Рисунок 2.2 – Пробоотборники длиной от 10 до 70 см

При работе с мокрым материалом, в особенности с большой глубины, как выяснилось в процессе испытаний, не всегда просто было отличить подлинный керн неразрушенного материала от прессованного шлама. Как сказано выше только сухие крепкие материалы извлекаются из пробоотборника самостоятельно, путем постукивания по пробоотборнику. Материалы влажные и насыщенные, а тем более, находящиеся в состоянии частичной или полной деструкции, требуют дополнительных механических усилий для извлечения, как правило, сопровождающихся легким или усиленным давлением / ударами. Это приводит к уплотнению или спрессовыванию материала внутри трубки и формированию «вторичного» керна, который не является показательным и не может служить в качестве образца.

Данная проблема привела к необходимости формулирование более жестких технических условий к приемке проб. Очевидно, что при определенных условиях, в частности при долговременном увлажнении, внутри конструкции могут образоваться локальные участки с аморфным материалом, утратившим прочность до состояния пластичности. Однако отличить подлинную пластичность

нетронутого материала, сформированную внутри стены, от искусственно сформированного шлама в результате его механического уплотнения в трубке не представляется возможным. В связи с этим было принято решение использовать в качестве образцов только твердые материалы, которые не деформируются при сжатии (вторичный керн является непрочным и рассыпается при незначительном усилии). Таким образом каждый образец пробы перед помещением в бюкс тщательно очищался от шлама и проверялся на сохранение целостности.

Количество образцов в пробе должно быть достаточным для проведения всех требуемых испытаний. Для базовых экспериментов, т. е. для определения влажностных и структурных характеристик необходимо не менее трех образцов. Кроме того, один большой образец или несколько мелких осколков нужны для оценки степени засоленности материала. Итого, для возможности проведения всех требуемых испытаний каждая проба должна состоять не менее, чем из 4 образцов. Однако, на практике такое количество получалось не всегда. Если прослойка материала небольшая, как например, растворный шов, то состав пробы мог не превышать одного – двух образцов. Аналогичная ситуация наблюдалась в случае очень крепкого материала, который позволял отбирать керны длиной 2–4 см. Если же материал, наоборот, сухой и ломкий, с очень мелкими образцами, то их количество в пробе могло достигать нескольких десятков. В случае однородного материала, когда есть возможность контролировать размер пробы, ее диапазон, как правило, составлял 5–7 см. В случае смены материала или в случае явно выраженной пустотности отбор пробы прекращался, и количество образцов, а также диапазон, мог существенно сократиться. Обратная ситуация могла возникнуть в случае сильно деструктированной кладки, когда на протяжении нескольких сантиметров не удавалось получить твердые образцы. В этом случае диапазон мог быть расширен до достижения требуемого количества материала.

Изначальная методика предполагала отбор проб только основного блока (кирпич / камень) и только с определенных, одинаковых для всех ситуаций, глубин: 0,5 см, 8 см, 20 см, 40 см, 58 см. Промежуточные участки между пробами высверливались обычным буром. По мере накопления опыта стало понятно, что,

кроме основного блока необходимо отбирать также образцы раствора, что, с одной стороны, увеличило количество участков отбора, с другой стороны, показало невозможность задавать глубины отбора идентичные для всех конструкций. Тем не менее часть материала, по-прежнему, удалялась буром. Однако такая схема отбора не позволяла полноценно определять морфологию анализируемого участка и полностью восстановить характер распределения влаги. Тогда было принято решение проходить всю намеченную глубину прободоотборником и, соответственно, собирать весь материал из отверстия. После этого количество проб на одно сечение, в среднем, стало составлять восемь – двенадцать штук (Рисунок 2.3). В особо сложных случаях количество проб могло увеличиваться до 13–14.

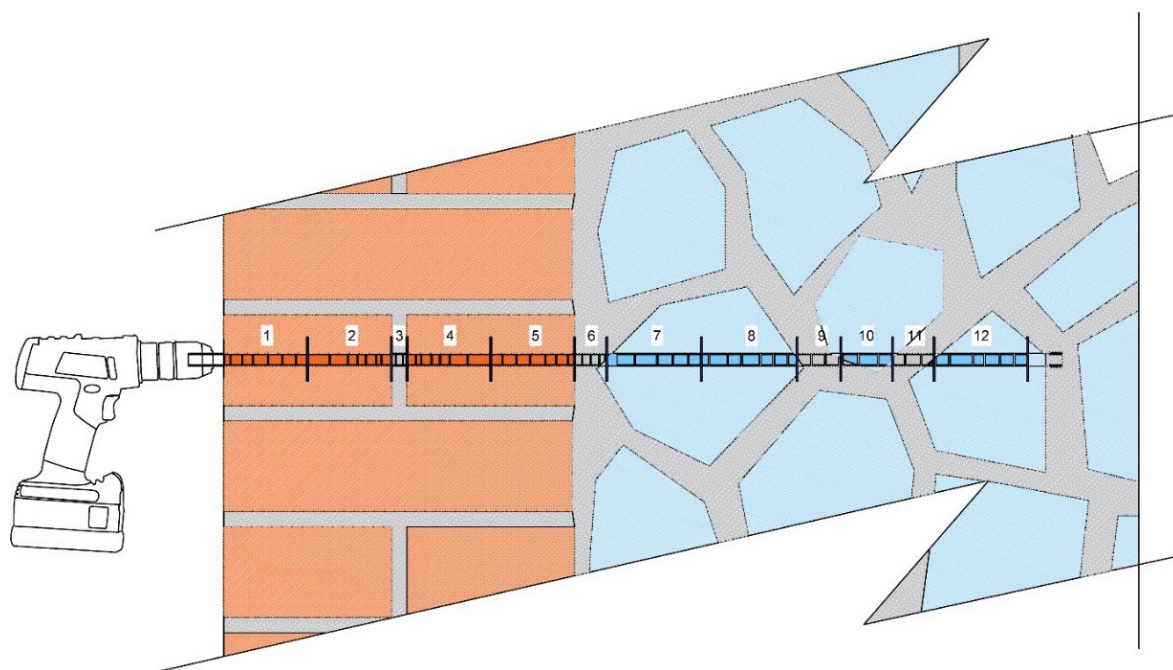


Рисунок 2.3 – Схема отбора проб

Внешний вид образцов целиком и полностью зависит от состояния материалов, вследствие чего, было принято решение об его использовании в качестве одного из критериев оценки качества. Чем крепче материал, тем более качественный керн получается при его отборе. И наоборот, чем более хрупкий и трещиноватый материал, тем меньшего размера и менее оформленные получаются

образцы. Как правило, деструктированные материалы были представлены в виде бесформенных осколков большего или меньшего размера.

Простое использование лабораторных бьюксов с притертой пробкой оказалось недостаточно надежным. Эксперименты показали, что бьюксы являются не вполне герметичными, и при сроках доставки образцов, превышающих несколько часов, часть влаги испарялась. Решение было найдено в виде пленки Parafilm, представляющей собой листовую парафин. Адгезия этой пленки приобретает не за счет клеящего вещества, а за счет высокой растяжимости, в результате чего после ее удаления на поверхности бьюкса не остается никаких следов. Данное требование являлось определяющим при выборе технологии герметизации бьюкса, поскольку первоначальное взвешивание образцов проводится вместе с бьюксом. Пленка сохраняет свои свойства в диапазоне от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$, что полностью охватывает потенциально возможный диапазон температур отбора проб на объекте.

2.2. Разработка методов лабораторных исследований

Метод определения влажности был взят по существующим стандартам лишь с минимальными корректировками [12; 13; 17; 21]. Для взвешивания образцов применялись весы Sartorius GC 803S-OCE с точностью до 4 знака. Бьюксы с пробами освобождались от герметизирующей пленки, взвешивались и высушивались со снятой крышкой до постоянной массы при температуре 105°C . После сушильного шкафа бьюксы закрывались крышками и помещались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, после чего взвешивались. Влажность по массе определялась по формуле:

$$W = \frac{(m_{\text{бв}} - m_{\text{б}}) - (m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})}{(m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})} * 100, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{бв}}$ – масса бьюкса с мокрой пробой,

$m_{\text{б}}$ – масса пустого бьюкса,

$m_{\text{бс}}$ – масса бьюкса с сухой пробой.

После завершения процедуры определения естественной влажности проб образцы извлекались из бюксов и инспектировались. Остатки порошков и наиболее мелкие осколки выбрасывались. Оставшиеся керны и осколки тщательно очищались, обстукивались для удаления неплотно держащихся фрагментов и фотофиксировались.

После фотофиксации производилось распределение образцов по видам исследований. Три наиболее крупных качественных образца каждой пробы раскладывались по корзинкам из нержавеющей стали для проведения основных исследований, а часть наиболее мелких осколков – на засоленность. Оставшаяся часть пробы (если есть) размещалась в зип-пакете, в котором проба будет храниться после завершения исследований. Для того, чтобы образцы, прошедшие испытания не смешались с нетронутыми образцами, для первых использовался второй более мелкий зип-пакет, располагающийся внутри более крупного общего.

Помимо ГОСТа [19] методика определения сорбционных характеристик основывалась на работе Б. Т. Сизова [50]. Образцы размещались в корзинках из нержавеющей стали в эксикаторах с требуемым давлением водяного пара. Использование корзиночек упрощало процедуру, позволяя взвешивать сами образцы, что позволило повысить точность результатов.

Параметры воздуха в эксикаторе создавались при помощи насыщенных растворов солей. В качестве контрольных были выбраны пять точек: 43% (карбонат калия), 63% (нитрит натрия), 74% (нитрат натрия), 85% (хлорид калия) и 98% (сульфат меди) [56]. Для ускорения процесса вместо керамической пластины внутри эксикатора размещалась площадка из нержавеющей проволоки, на плоскости которой размещались «корзинки» из нержавеющей стали с образцами. Однако после нескольких пробных циклов выяснилось, что размещение корзиночек на уровне «ступеньки» эксикатора приводит к их периодическому намоканию, природу которого выяснить не удалось. Дальнейшее экспериментирование показало, что намокание исчезает при размещении пластины на несколько сантиметров выше ступеньки. В связи с этим, пластина была поднята несколько

выше центра эксикатора при помощи «ножек», изготовленных из отрезков пятимиллиметровой шпильки, опирающихся на ступеньку (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Расположение корзинок с образцами в эксикаторе

Время выдержки образцов для достижения равновесия на каждом этапе было определено на основе опыта зарубежных исследователей, в работах которых оно составляло от нескольких часов до нескольких дней для кернов диаметром 2–5 см [292; 308; 317; 330; 381]. Поскольку предварительные эксперименты показали, что 72 часов достаточно для достижения равновесия всех используемых образцов, то именно этот период был выбран в качестве оптимального. Остальные этапы ничем не отличались от процедуры определения влажности, описанной выше. Образцы высушивались при 105°C до постоянного веса, перекладывались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, взвешивались и вновь размещались в эксикаторах с более высокой степенью относительной влажности.

Важно отметить, что определение сорбционных характеристик всех образцов проводилось дважды. «Первичная» сорбция выполнялась на образцах, прошедших только процедуру определения естественной влажности, т. е. не изменивших свое состояние. «Вторичная» сорбция проводилась после циклов увлажнения / высыхания, т. е. на очищенных от примесей образцах. Необходимость повторной процедуры была вызвана тем, что в неблагоприятных влажностных условиях на отдельных участках скапливается множество примесей (частицы почвы, водорастворимые соли, микрообломки и т. д), могущих существенно искажать физические свойства материалов, в частности уменьшать пористость, размер пор и увеличивать гигроскопичность [65]. Эти изменённые «кажущиеся» свойства важны с той точки зрения, что именно в таком формате данные материалы проявляют себя внутри стены. Однако для определения истинных свойств необходимо очистить поровое пространство от примесей.

Процедура водопоглощения разрабатывалась на основе российских и зарубежных стандартов, а также опыта их практического применения исследователями [13; 14; 224; 369; 378]. Цикл водопоглощения состоял из двух последовательных этапов. Этап первый представлял собой водопоглощение при атмосферном давлении, этап второй – водопоглощение при повышенном давлении. Для всех процедур, связанных с увлажнением, использовалась только дистиллированная вода. На первом этапе образцы в корзинках оставлялись в холодной дистиллированной воде на 12 часов, после чего промакивались мягкой тканью для удаления излишней влаги с поверхности и взвешивались. На втором этапе образцы в корзинках располагались в воде в кастрюле, которая ставилась на плитку и нагревалась. После закипания температура конфорки несколько снижалась, чтобы избежать выкипания воды, и кастрюля закрывалась крышкой. Образцы выдерживались в кипящей воде в течение двух часов, после чего кастрюля снималась с плитки, и оставлялась остывать. После двух часов остывания с образцов удалялась лишняя влага и проводилось взвешивание. После взвешивания образцы несколько часов просушивались при комнатной температуре, затем ставились в сушильный шкаф и доводились до постоянного веса.

Первый цикл водопоглощения, за редким исключением, приводил к значительным весовым потерям образцов, так, что полученные результаты, как правило, не играли значительной роли в последующем анализе. Второй и, в особенности, третий, циклы давали уже достаточно надежные значения, пригодные для использования. Поскольку основная нагрузка в цикле и, соответственно, основные весовые потери происходили в процессе кипячения, то прирост веса образцов после кипячения более корректно определять относительно последующего сухого веса, полученного после кипячения. Тогда как прирост веса в холодной воде определялся по предыдущему сухому весу.

Процедура определения открытой пористости и кажущейся плотности была разработана на основе стандартов, а также опыта их практического применения исследователями [11; 79; 180]. Для возможности гидростатического взвешивания была изготовлена специализированная приставка к весам, позволяющая взвешивать образец в воде. Пластиковое ведерко, обрезанное до подходящего размера, устанавливалось над чашкой для взвешивания на деревянных подставках таким образом, чтобы между ним и чашкой оставалось пространство в несколько миллиметров. В это пространство вставлялась скоба из проволоки, передающая нагрузку с корзинки с образцом на чашку. Для минимизации влияния крепежа корзинки к скобе, в качестве такового использовалась леска. Расчет открытой пористости (P_o , %) производился по формуле:

$$P_o = \frac{(m_3 - m_{c4})}{(m_{c4} - m_g)} * 100. \quad (2.2)$$

Расчет кажущейся плотности (ρ_b , кг/м³) производился по формуле:

$$\rho_b = \frac{(m_{c4} * \rho_w)}{(m_3 - m_g)}, \quad (2.3)$$

где m_3 – масса насыщенного при повышенном давлении образца по результатам третьего цикла,

m_{c4} – масса сухого образца последнего взвешивания (после последнего кипячения),

m_g – масса образца в воде,

ρ_w – плотность воды (принимается за 1 кг/м³).

Микроскопические исследования проводились на настольном сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM4000 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром Bruker QUANTAX 75 для элементного анализа. Исследования под микроскопом требуют подготовки образцов, как с точки зрения формы, так и с точки зрения поверхности. Подготовка формы подразумевает калибровку керн по торцам, т. е. придание ему формы цилиндра с параллельными плоскостями. Подготовка поверхности подразумевает уменьшение ее шероховатости, как минимум, до нескольких микрон.

Для выполнения этих условий автором было разработано и изготовлено специализированное приспособление, позволяющее обрабатывать плоскость заготовки строго перпендикулярно к оси цилиндра (Рисунок 2.5). Для крепления образцов был использован цанговый токарный патрон, осуществляющий равномерный зажим по всей боковой площади, что практически исключает возможность раскола образцов. Крепежные отверстия патрона были направлены вдоль оси заготовки, что позволило осуществить крепление узла в перпендикулярной плоскости. Перемещение в параллельной плоскости осуществлялось при помощи линейных подшипников, что обеспечивало приемлемую точность даже в микронном диапазоне. Каркас приспособления был выполнен из 18-ти миллиметровой фанеры. С одной стороны, фанера обладает достаточной прочностью и наименее подвержена влажностным деформациям, с другой стороны, она позволяет обработку в лабораторных условиях, в отличие, например, от металлических листов. В нижнем основании была выфрезерована рамка, предназначенная для размещения алмазных шлифовальных камней. Высота углубления была сделана, примерно, в одну треть высоты камней, чтобы обеспечить их легкую смену. Плотность посадки камней достигалась точностью посадочного отверстия. Использование на последнем этапе камней с минимальной зернистостью позволяло достичь приемлемой шероховатости.

Испытание на определение прочностных характеристик по методу одноосного сжатия явилось одним из наиболее трудно сочетаемым, как с микроразмерами образцов, так и с их «разнокалиберностью». По существующим

нормативам кирпич вообще не оценивается в виде отобранного из кладки керна, а только в виде склеенных между собой целых кирпичей или половинок [15], при этом в ГОСТ Р 57349 2016 года, заимствованном из европейской практики, форма образцов никак не оговаривается [22]. В виде кернов допускается оценивать только камень и бетон. Однако минимально допустимые размеры керна камня составляют 40 мм с коэффициентом 0,81 [15], а минимально допустимые размеры керна бетона составляют 70 мм [16] или 50 мм [20] с коэффициентом 0,85. В качестве же основного размера, что куба, что диаметра керна во всем мире используется 100 мм [81; 114; 147; 204]. Однако существуют исследования, по сравнению результатов сжатия на прессе кернов 28 мм, и результаты этих исследований показывают, что какая-либо принципиальная разница между мелкими и стандартными образцами отсутствует [102; 201; 202], естественно, с той оговоркой, что тестируемые материалы обладают соотносимой однородностью. М. Sklodowski провел сравнения испытаний на прочность на кернах того же диаметра, что и в нашем случае, т. е. диаметром, 6–8 мм. При этом его сравнения охватывают не только кирпич, но и известняк. Во всех случаях делается вывод, что, при прочих равных, микрокеры могут давать сопоставимые результаты со стандартными испытаниями [336–341].

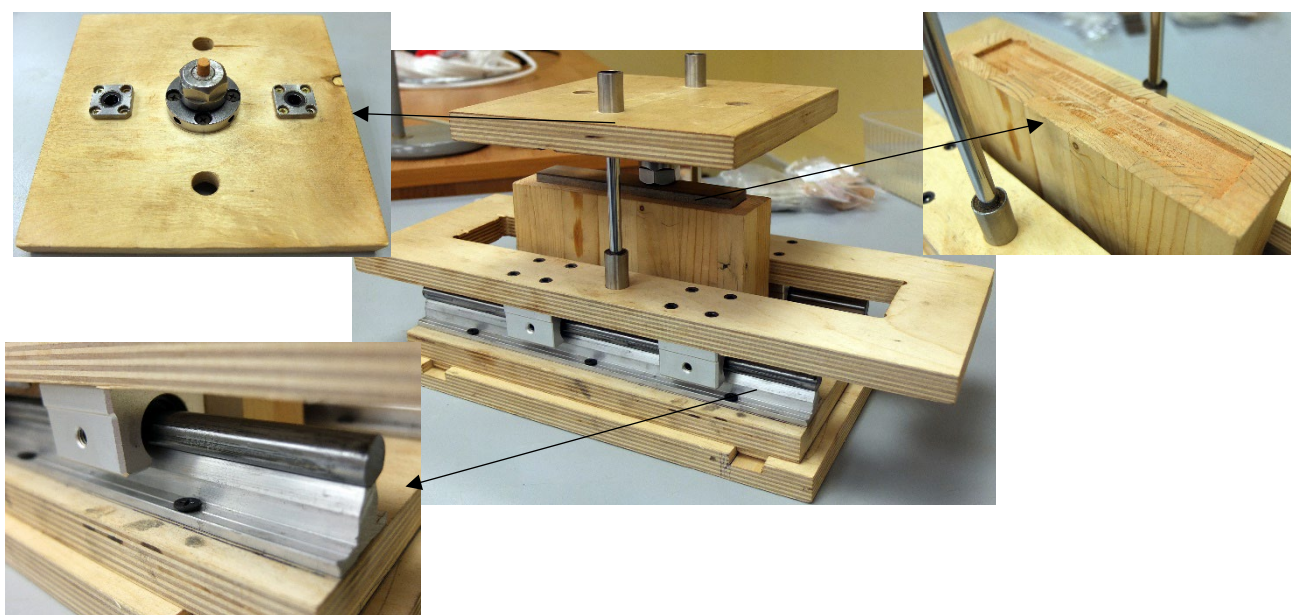


Рисунок 2.5 – Приспособление для калибровки и шлифовки образцов

Для проведения испытаний был выбран пресс малогабаритный ПМР-МГ4 с ручным приводом механизма нагружения. Пресс внесен в Госреестр РФ под № 74127-19. Для более точного позиционирования образца верхняя квадратная пластина была заменена на латунный стержень, диаметром 8 мм. Для снижения трения в обоих основаниях цилиндра размещались полиэтиленовые пленки. Скорость нагружения составляла, примерно, 0,1 Мпа/с. Прочность образцов вычислялась по формуле:

$$R = \alpha \frac{F}{S} 0,78, \quad (2.4)$$

где α – масштабный коэффициент, принимаемый по ГОСТ 28570, Таблица 2,

F – разрушающая нагрузка (кН),

S – площадь основания (см²),

Коэффициент 0,78 был взят из [58].

Определение методики ультразвукового исследования проводилось на основе стандарта [18]. Основная сложность заключалась в том, что на расстоянии нескольких миллиметров (средняя длина зерна) датчики ультразвукового аппарата начинают влиять друг на друга напрямую через воздух. Для преодоления этой проблемы было изготовлено 10 свинцовых пластин, толщиной 1 мм, с линейкой отверстий диаметром от 6,7 до 7,7 мм, с шагом 0,1 мм, позволяющие плотную посадку для любого зерна. Поскольку свинец блокирует ультразвук, то волна имеет возможность проходить только через образец, что позволяет получать информацию об ее скорости без искажения. Скорость прохождения волны вычислялась по формуле:

$$V = \frac{L}{t}, \quad (2.5)$$

где V – скорость (м/с),

L – длина образца (м),

t – время прохождения волны (с).

Оценка степени засоленности материалов проводилось по методике, предлагаемой Аринушкиной и Аракелян [5], основанной на приготовлении водной вытяжки из материала, ее выпаривании и взвешивании. Определение количества солей производилось по формуле:

$$\frac{(m_{\text{чс}} - m_{\text{ч}}) * 5 * 100}{m_{\text{бс}} - m_{\text{б}}}, \quad (2.6)$$

где $m_{\text{чс}}$ – масса чашки с пробой,

$m_{\text{ч}}$ – масса чашки,

$m_{\text{бс}}$ – масса бюкса с пробой,

$m_{\text{б}}$ – масса пустого бюкса.

Процедура определения морозостойкости разрабатывалась в соответствии с ГОСТ 7025–91 [14]. Образцы высушивались до постоянного веса, взвешивались и насыщались в течении 12 часов в холодной воде. Уменьшение времени выдержки в воде было связано с меньшим размером образцов. После этого они помещались в морозильную камеру при $t = -24^{\circ}\text{C}$ не менее, чем на 4 часа. После морозильной камеры образцы размещались в дистиллированной воде для оттаивания не менее, чем на 2 часа. Замораживание и оттаивание составляли один цикл процедуры. Всего выполнялось 25 таких циклов. После завершения всех циклов образцы высушивались до постоянного веса и взвешивались. Оценка весовых потерь производилась по формуле:

$$WL_{\text{fr}} = 100 - ((m_{\text{fr}} / m_0) * 100), \quad (2.7)$$

где WL_{fr} – потери в весе образца (%) после циклов замораживания / оттаивания,

m_0 – сухой вес образца до процедуры,

m_{fr} – сухой вес образца после процедуры.

2.3. Обработка результатов

Полученные в результате лабораторных испытаний данные позволяли рассчитывать следующие параметры.

Коэффициент насыщения (S_{sat}) представляет собой отношение водопоглощения при атмосферном давлении к водопоглощению при повышенном давлении и рассчитывался по формуле:

$$S_{\text{sat}} = \frac{S}{B} * 100, \quad (2.8)$$

где S – водопоглощение при атмосферном давлении (в холодной воде),

B – водопоглощение при повышенном давлении (в кипящей воде).

Степень микропористости ($P_{0,1}$), представляет собой процент сорбционных пор в материале [106; 308] и определялась по формуле:

$$P_{0,1} = \frac{a_{98}}{B} * 100, \quad (2.9)$$

где a_{98} – количество сорбированной влаги (%) при относительной влажности 98%.

Удельная площадь поверхности ($S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{г}$) определялась сравнительным методом [43] по следующей формуле:

$$S_{\text{уд}} = \frac{a_{62} - a_{45}}{\alpha_{62} - \alpha_{45}}, \quad (2.10)$$

где a_{62} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 62% ($\text{мкмоль}/\text{г}$),

a_{45} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 45% ($\text{мкмоль}/\text{г}$),

α_{62} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 62% ($\text{мкмоль}/\text{м}^2$),

α_{45} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 45% ($\text{мкмоль}/\text{м}^2$).

Абсолютная величина адсорбции определялась по формуле:

$$\alpha_i = \frac{a_i - m_c}{m_c * SSA * 0,000018}, \quad (2.11)$$

где a_i – адсорбция стандартного образца при относительной влажности i (г),

m_c – сухой вес стандартного образца (г).

В качестве стандартных образцов использовались четыре образца кирпича с разными характеристиками пористого пространства. Два образца относились к

Успенскому собору в Рязани (УР-1, УР-2), два – к церкви Косьмы и Дамиана в Суздале (СКД-1, СКД-2). Анализ образцов проводился на кафедре функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС методом низкотемпературной адсорбции азота при помощи анализатора удельной поверхности и пористости Quantochrome Nova 1200e. Все стандартные образцы продемонстрировали хорошую сходимость результатов, при сравнении значений удельной поверхности, полученной на анализаторе с расчетным методом (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Сравнение результатов $S_{уд}$, полученных на анализаторе (выделены жирным шрифтом) с расчетными значениями

	УР-1	УР-2	СКД-1	СКД-2
УР-1	14,1	10,2	14,4	1,2
УР-2	14,2	10,3	14,5	1,2
СКД-1	14,3	10,4	14,7	1,2
СКД-2	13,9	10,2	14,3	1,2

Средний размер пор образцов (d_{cp} , нм) рассчитывался по формуле [43]:

$$d_{cp} = \frac{V_p * 4 * 10^3}{S_{уд}}, \quad (2.12)$$

$$V_p = \frac{V * m_0 * P_0}{100}, \quad (2.13)$$

где V_p – объем пор ($\text{см}^3/\text{г}$),

V – объем образца (см^3).

В отличие от новых, исторические материалы могут иметь измененную микроструктуру с развитой сетью микротрещин, подверженную частичному или полному разрушению под действием даже незначительных напряжений. Поскольку все лабораторные исследования вызывают напряжения внутри образцов, то это может повлечь за собой развитие деструктивных процессов, в результате чего образец может частично изменить свои характеристики в процессе эксперимента. Максимальные напряжения связаны с процессами кипячения и сушки. Однако даже такие «мягкие» процедуры как сорбция, хоть и значительно менее явно, но также вызывают внутренние напряжения. В результате на каждом

этапе могут возникать эффекты весовых потерь, что существенно усложняет интерпретацию данных. Это вызывает необходимость разработки внутренних нормативов обработки результатов, позволяющих свести возможные погрешности и неточности к минимуму.

Возрастание давления водяного пара приводит к возрастанию количества сорбированных молекул воды материалом, что увеличивает его совокупный вес. Противоположный вариант, при котором вес материала снижается при возрастании давления водяного пара, может возникнуть только в том случае, если параллельно происходит частичная утрата материала. Для первичной сорбции весовые потери являются обычным явлением и характерны, по меньшей мере, для трети образцов всех объектов. Для вторичной сорбции весовые потери существенно снижаются и являются уже, скорее, исключением.

Поскольку обработка результатов с учетом весовых потерь невозможна, то была выработана следующая методика. Все значения, продемонстрировавшие отрицательную динамику, дублировались в отдельный файл, который сохранялся в нетронутном виде для последующего анализа. В рабочем же файле за точку отсчета принимался минимальный вес образцов и дальнейший прирост считался от него. Если общее снижение не превышало 3 единиц в четвертом знаке (не более чем 0,0003), то подобные колебания списывались на технические погрешности. При снижении, превышающем 3 единицы в четвертом знаке образец помечался желтым цветом. В дальнейшем при усреднении значений сорбции по трем образцам данный образец участвовал только в том случае, если его значения не слишком сильно отличались от двух остальных. При снижении, превышающем 9 единиц в четвертом знаке (более 0,0009) образец помечался красным цветом. В дальнейшем при усреднении значений сорбции по трем образцам данный образец не принимался во внимание.

В том случае если все три образца пробы имели явно выраженные весовые потери, то красным выделялось усредненное значение сорбции, что указывало на факт его недостаточной достоверности.

Обработка данных по водопоглощению проходила в два этапа. На первом этапе усреднялись данные по каждому из образцов пробы по трем циклам. При усреднении учитывались данные по весовым потерям. В случае какого-либо искажения полученные значения могут изменяться только в сторону уменьшения. В связи с этим уменьшение одного из показателей на фоне высоких весовых потерь в рамках одного цикла являлся поводом к тому, чтобы данный показатель не учитывался.

На втором этапе усреднялись данные по трем образцам пробы. Здесь уже исключение значений производилось достаточно редко и, как правило, учитывались все три показателя.

Данные по гидростатическому взвешиванию во всех случаях обрабатывались идентично данным по водопоглощению с целью избежать разной интерпретации одних и тех же материалов.

Основной задачей этапа лабораторных испытаний образцов являлось получения достаточного количества данных, пригодных для последующего анализа и интерпретации. Если полученные в процессе обработки данные носили недостоверный характер ставился вопрос об их удалении из общей базы данных. Однако здесь определяющую роль играл факт, какую информацию несли эти данные, поскольку нередко возникала ситуация, когда удаление, пусть даже не слишком достоверных данных, могло привести к бóльшим затруднениям в процессе интерпретации, чем их аккуратный учет.

В том случае, если удаление этих данных принципиально не изменяло общую картину анализируемого участка, данные удалялись. Если же удаление не позволяло сделать вывод об анализируемом участке, то данные оставлялись, но маркировались красным цветом, указывающим на то, что эти данные могут использоваться только для оценочной характеристики или проверки общей тенденции, но не для точного анализа. Данная методика обработки результатов показала свою эффективность в процессе дальнейших исследований.

2.4. Выводы по 2 главе

Представленная лабораторно-практическая часть исследований разрабатывалась и оттачивалась на протяжении более чем десятилетнего периода. В своем основном виде она была сформирована к 2017 году, однако, учитывая огромное количество вопросов и проблем, требующих решения, она продолжает развиваться до сих пор.

Данная методика исследования учитывает и до определенной степени решает все принципиальные вопросы, поставленные в начале главы, в частности, она позволяет получать:

- Достаточное количество материалов для исследования с минимальной степенью инвазивности для памятника;
- Материалы с ненарушенной структурой, пригодные для большинства видов лабораторных испытаний;
- Материалы на глубину до 60–65 см, позволяя полностью фиксировать морфологию всех структурообразующих частей кладки;
- Достаточное количество данных для анализа и интерпретации состояния материалов.

Представленная методика получения и обработки материалов легла в основу разработки практической схемы отбора проб и методики анализа результатов лабораторных исследований, представленных в главах 3, 4.

Глава 3. Разработка подхода к определению схемы участков отбора проб материалов конструкций ОКН

В главе 3 обосновывается подход к определению схемы участков отбора проб материалов для лабораторных исследований. Выбор контрольных участков предлагается производить на основе равномерной, статистически достаточной, сетки контрольных горизонтальных сечений – зондажей, поскольку ориентирование на визуальные критерии, а также использование принципа интерполяции данных в условиях высокой степени неоднородности исторических конструкций, могут привести к неверным выводам.

3.1. Критерии для определения участков отбора проб

Наиболее очевидным способом выявления участков, подверженных увлажнению и требующих отбора материалов для лабораторных испытаний, является визуальное обследование состояния поверхности. Однако поверхностные явления, фиксируемые в процессе визуального обследования, могут не отражать внутренние проблемы кладки с влажностью, а определяться факторами окружающей среды, в частности, микроклиматом.

Так, визуально фиксируемое увлажнение поверхностного слоя не может служить однозначным показателем увлажненного состояния материалов толщи стены, т. е. присутствия капиллярного подсоса. В качестве показательного примера можно привести участок центральной части северной стены подклета Троице-Знаменской церкви в Лежнево (Рисунок 3.1). Более темный оттенок нижней части стены четко выделяет зону влажного материала, подразумевая наглядное проявление капиллярного подсоса. Однако лабораторные исследования образцов проб в контрольном горизонтальном сечении кладки на высоте 0,2 м от уровня пола, т. е. на 40 см ниже визуальной границы влажного и сухого материалов, показали, что высокая влажность относилась только к слою штукатурки; тогда как

в поверхностном слое кирпича на глубине 2–6 см влажность снижалась до минимума (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 – Влажная зона в северной части подклета Троице-Знаменской церкви в Лежнево

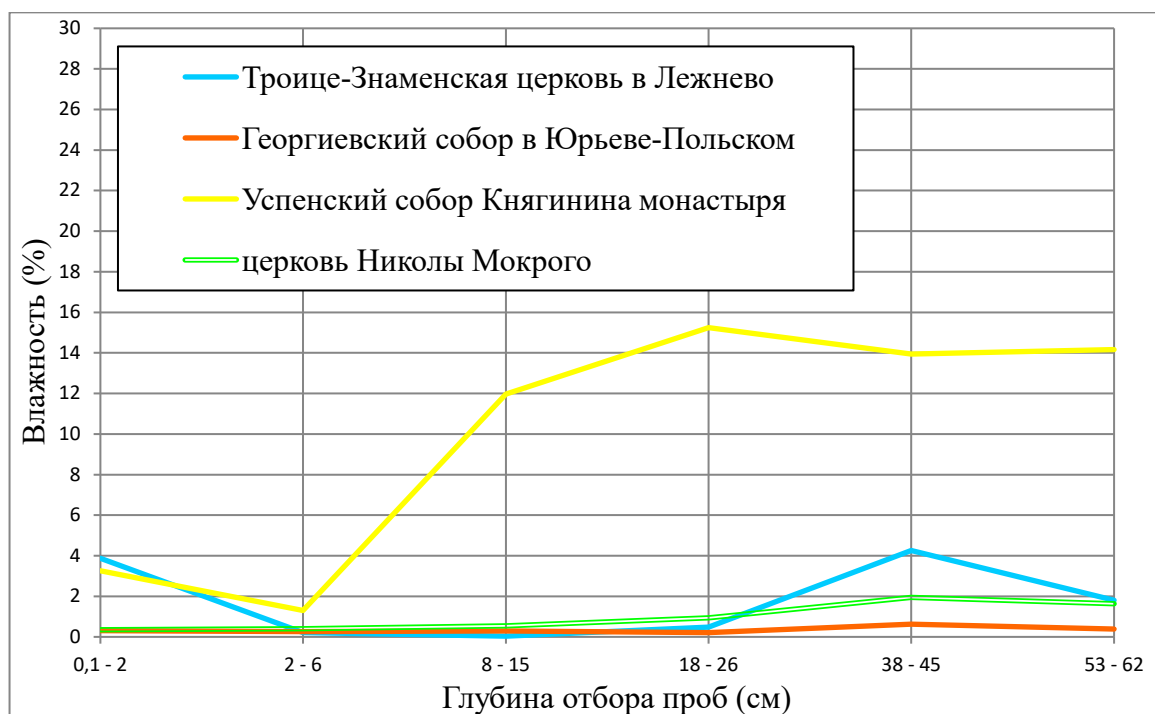


Рисунок 3.2 – Распределение естественной влажности материалов кладки в контрольных сечениях Троице-Знаменской церкви в Лежнево, Георгиевского собора в Юрьеве-Польском, Успенского собора Княгинина монастыря и церкви Николы Мокрого

Это позволило сделать вывод, что визуально фиксируемая влажность поверхности нижней части стены связана с сорбционно-конденсационными процессами и процессами массопереноса и не может служить индикатором капиллярного подсоса и влажности материалов в объеме кладки.

С другой стороны, визуальные признаки изменения поверхности конструкции не позволяют учесть временной фактор, поскольку могут быть связанными с разовыми или циклическими событиями, уже завершёнными на момент проведения обследования. В качестве таких признаков нередко выступают кристаллизованные на поверхности соли, оказывающиеся при инструментальной проверке не отражением проходящего процесса высыхания, а остаточным явлением. На Рисунке 3.3 приведен участок северной стены северной апсиды Георгиевского собора в Юрьеве Польском, где высолы на поверхности наблюдались на высоту до 1,5 метров от уровня пола. Лабораторные исследования образцов проб показали, что материалы нижней части стены на момент исследования находились в сухом состоянии по всей глубине отбора проб (Рисунок 3.2). Идентичную картину можно видеть и на примере Успенского собора Княгинина монастыря. На Рисунке 3.4 приведен участок северной части западной стены четверика на высоте 1,2 метра с явными признаками солевой деструкции. Однако лабораторные исследования образцов проб показали, что естественная влажность поверхностных слоев кладки не превышала 1,3–3,3% (Рисунок 3.2).

Аналогичные соображения относятся и к иным формам разрушения поверхности, инициируемым влагой. На Рисунке 3.5 показан участок южной стены церкви Николы Мокрого с признаками мучнистого разрушения лицевой поверхности кирпича. Лабораторные исследования показали, что на момент исследования материалы кладки данного участка находились в сухом состоянии (Рисунок 3.2). Деструкция поверхности стен алтарной части Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря наблюдалась на высоту до 2–2,5 метров от уровня пола (Рисунок 3.6). Однако, лабораторные исследования образцов проб конструкций южной части центральной апсиды на высоте 0,5 м от уровня пола

показали, что степень увлажнения поверхностного слоя (до 15 см глубины) на момент исследования приближалась к минимуму (Рисунок 3.7).

Следует отметить и возможность обратной ситуации, когда визуально «хорошее» состояние поверхности, без прямых (изменение цвета) и косвенных (высолы, деструкция) признаков увлажнения, не может гарантировать отсутствие проблем с увлажнением материалов в объеме кладки. На Рисунках 3.8, 3.9 приведены участки стен южной части Спасо-Преображенского собора на Соловках и центральной апсиды Успенского собора в Рязани без указанных признаков. Однако лабораторные исследования образцов проб показали существенное увлажнение материалов в глубине конструкций (Рисунок 3.7).

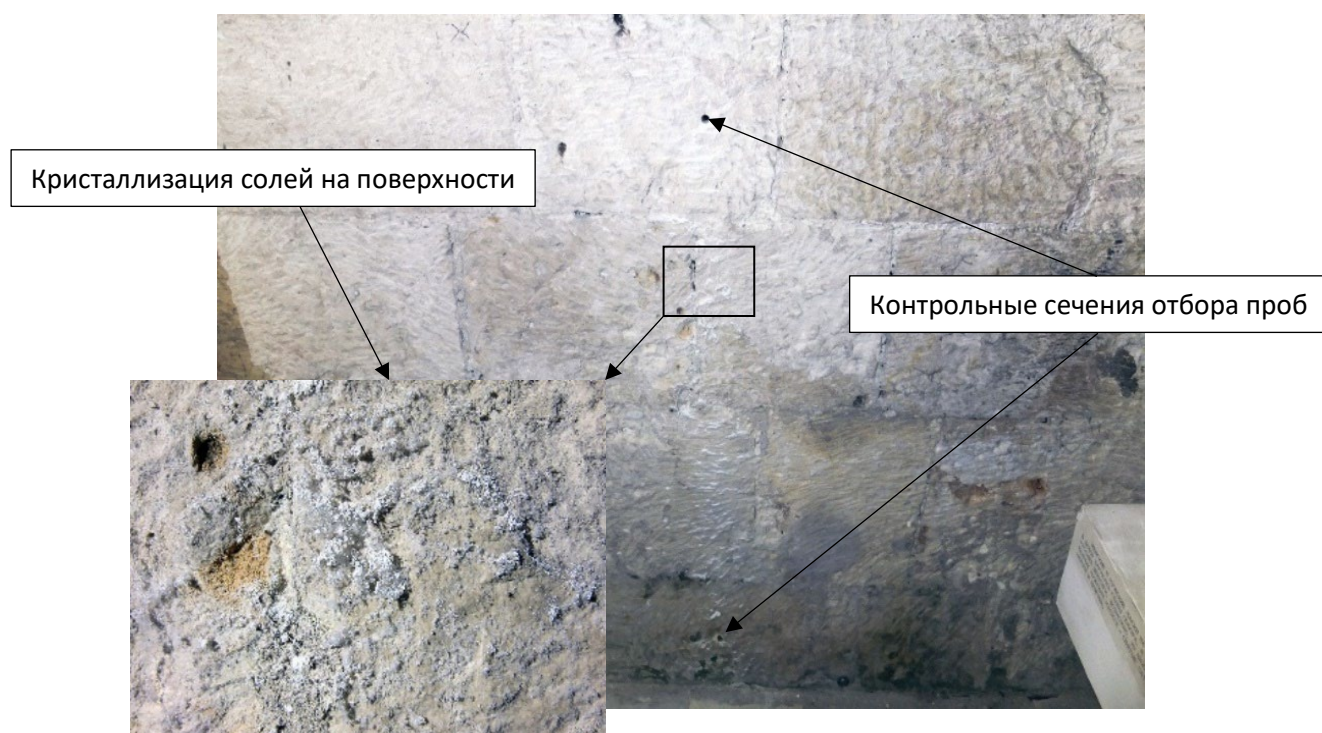


Рисунок 3.3 – Георгиевский собор в Юрьеве-Польском. Высолы на поверхности северной стены северной апсиды



Рисунок 3.4 – Северная часть западной стены Успенского собора Княгинина Монастыря во Владимире. Солевая деструкция поверхности.



Рисунок 3.5 – Деструкция поверхности кирпича центральной части южной стены церкви
Николы Мокрого в Ярославле

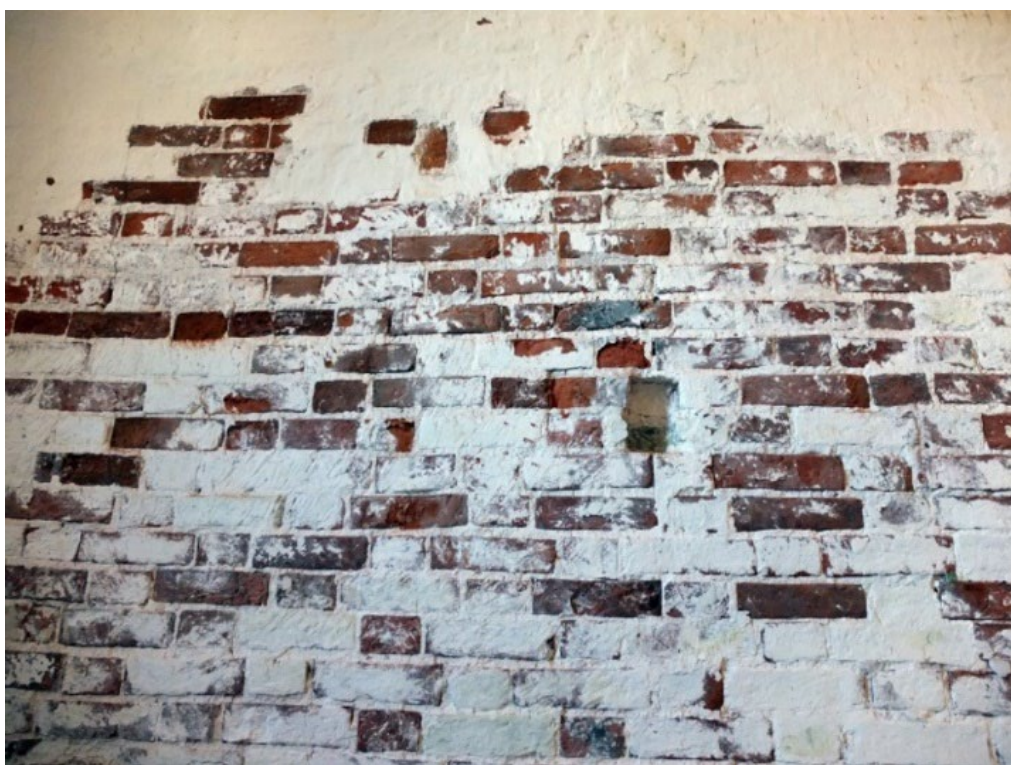


Рисунок 3.6 – Деструкция поверхности кирпича центральной части алтарной стены Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря на высоту до 2,5 метров

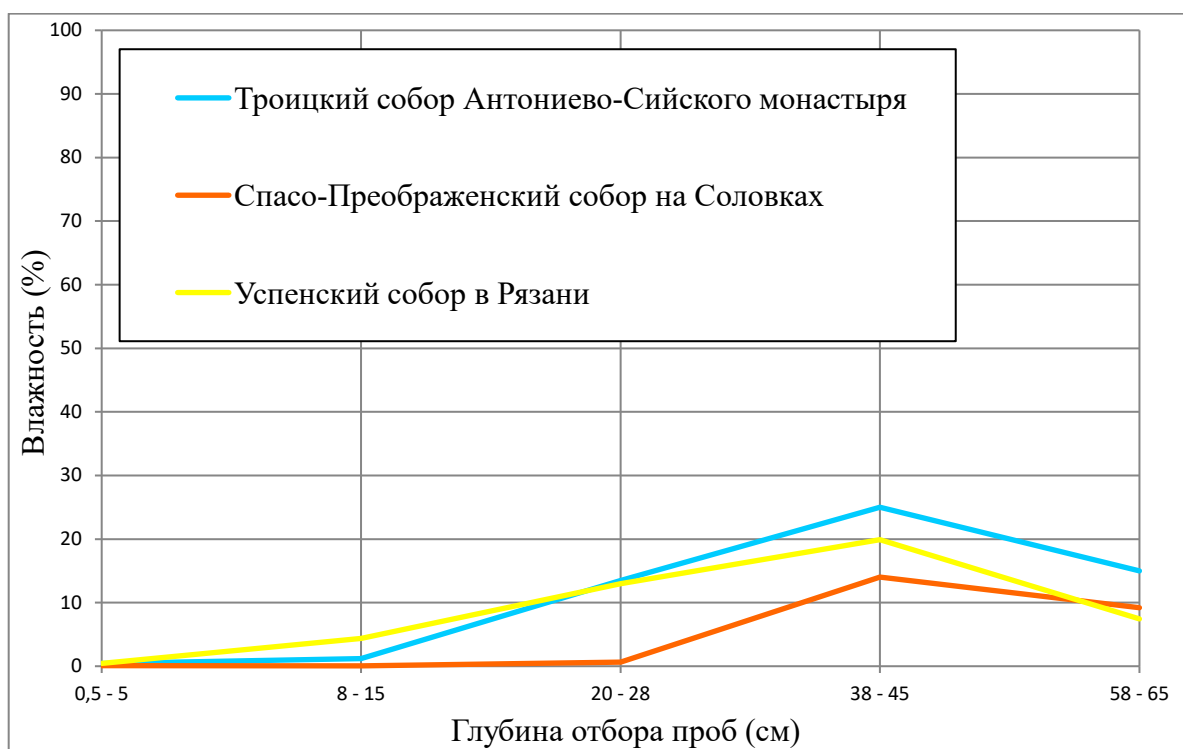


Рисунок 3.7 – Распределение естественной влажности материалов кладки в контрольных сечениях Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря, Спасо-Преображенского собора на Соловках и Успенского собора в Рязани



Рисунок 3.8 – Южная часть западной стены четверика Успенского собора на Соловках с отсутствием визуальных признаков увлажнения и деструкции



Рис 3.9 – Северная стена центральной апсиды Успенского собора в Рязани с отсутствием визуальных признаков увлажнения и деструкции

Приведенные данные показывают, что выбор контрольных участков для отбора проб только на основании визуального состояния поверхности не является

оправданным. Более корректным, с нашей точки зрения, представляется использовать сетку равномерно распределенных контрольных участков, позволяющую представить картину состояния с максимально возможной статистической достоверностью.

3.2. Количество участков отбора проб в плане здания

Вторым основополагающим вопросом при определении участков отбора проб является частота сетки контрольных горизонтальных сечений – зондажей. Результаты экспериментальных исследований памятников архитектуры показывают, что конструкции одного объекта, включая относительно близко расположенные участки, могут находиться в разных условиях с точки зрения доступа грунтовых вод и, соответственно, в разном состоянии, с точки зрения, как влажности, так и условий развития процессов деструкции. На Рисунках 3.10, 3.11 приведены данные по влажности материалов поверхностных слоев (раствор, кирпич) конструкций относительно близко расположенных участков различных объектов. Как можно видеть разница по влажности достигает 10–12%. Также могут существенно различаться и физические свойства материалов. На Рисунках 3.12, 3.13 приведены значения максимальной сорбции для раствора и кирпича, откуда видно, что разница показателей может превышать 15–17%.

Исходя из сказанного можно заключить, что прямая интерполяция данных в условиях исторических конструкций является неоправданной и может привести к неверным выводам. Иными словами, анализ состояния объекта на основании нескольких проб не может претендовать на достоверность, в соответствии с чем, каждая зона объекта должна быть представлена не одним, а несколькими контрольными участками отбора проб.

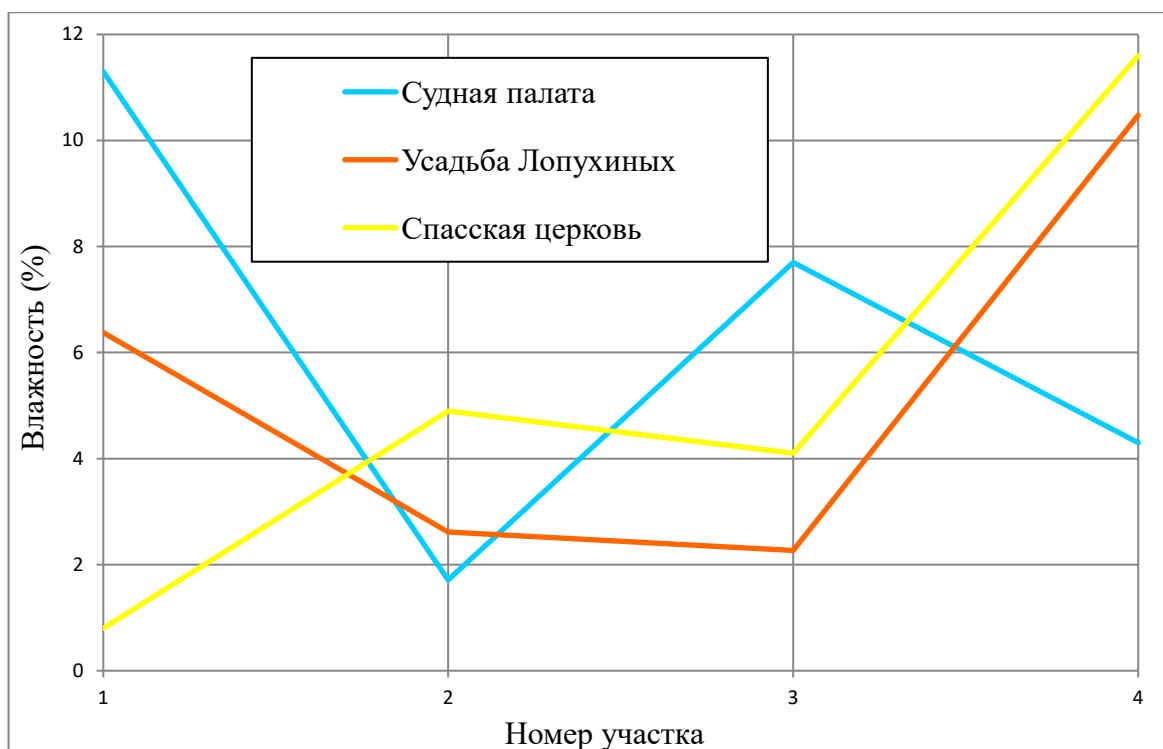


Рисунок 3.10 – Естественная влажность поверхностного слоя (кирпич) соседних участков стен Судной палаты Архангельского собора Московского Кремля, Усадьбы Лопухиных в Москве, Спасской церкви в Киово в Лобне.

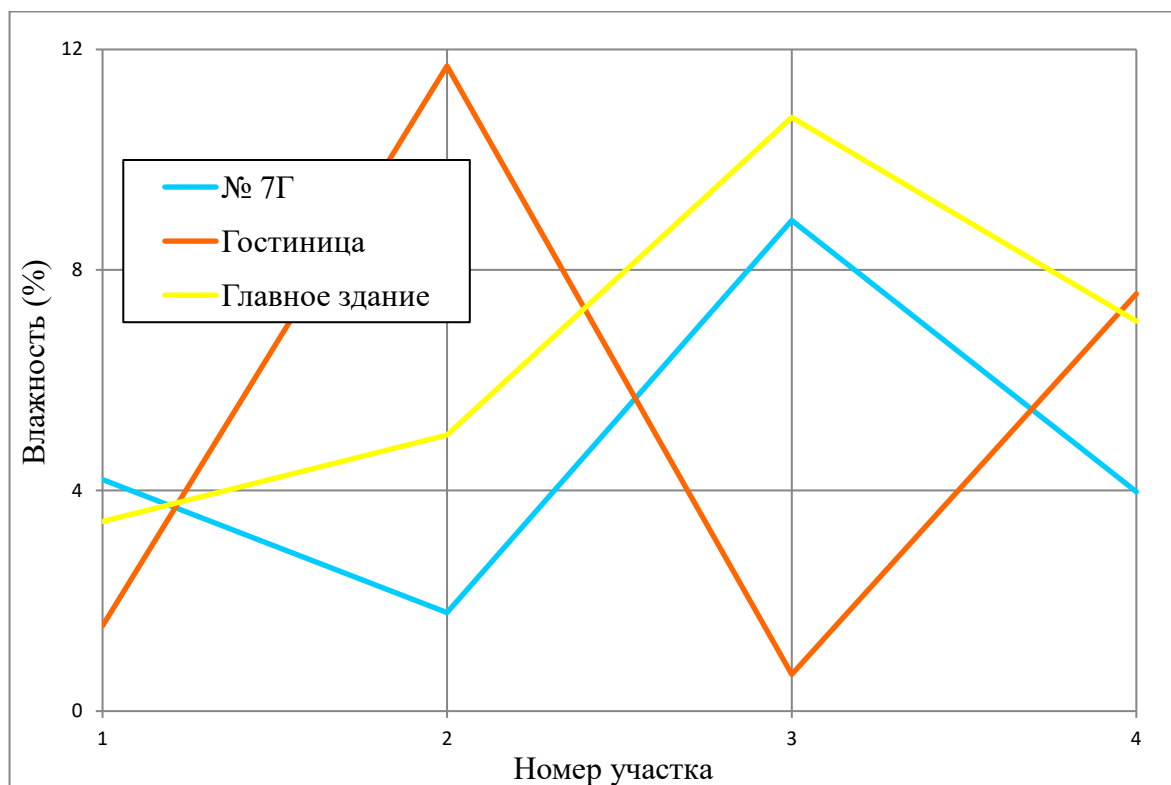


Рисунок 3.11 – Естественная влажность поверхностного слоя (штукатурка) соседних участков стен зданий Духовной Академии СПб (7Г, гостиница, главное здание).

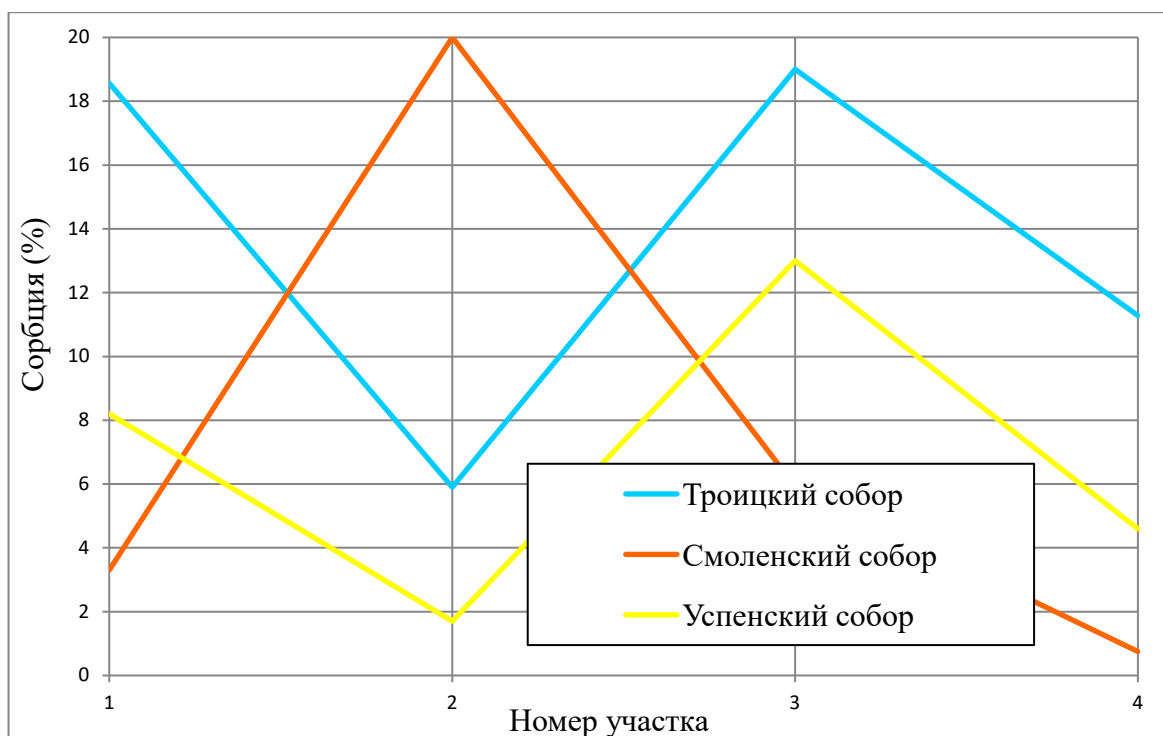


Рисунок 3.12 – Максимальная сорбция поверхностного слоя (кирпич) соседних участков стен Троицкого собора в Яхrome, Смоленского собора Новодевичьего монастыря, Успенского собора в Смоленске

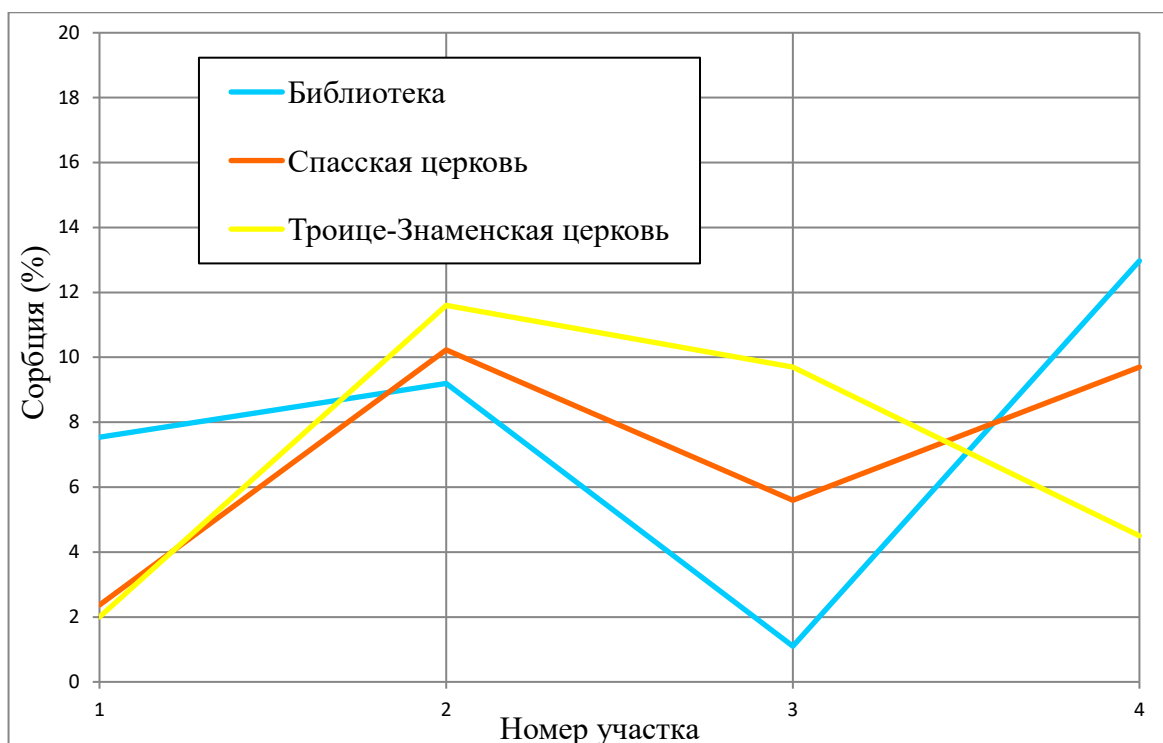


Рисунок 3.13 – Максимальная сорбция поверхностного слоя (штукатурка) соседних участков стен здания библиотеки Духовной Академии в СПб, Спасской церкви в Киово в Лобне, Троице-Знаменской церкви в Лежнево

3.3. Количество участков отбора проб по глубине и высоте конструкций

Не менее важным вопросом является количество по высоте и протяженность по глубине контрольных сечений – зондажей. С точки зрения соотношения скорости поступления влаги от источника увлажнения со скоростью отдачи влаги путем испарения, в каждый конкретный момент времени в конструкции, состоящей из относительно однородных материалов, можно выделить три зоны (Рисунок 3.14). В нижней части располагается зона «высокой скорости», где на каждом отдельно взятом участке скорость подвода влаги превышает скорость ее отвода.

Условно эту зону можно обозначать «зоной насыщения», поскольку до тех пор, пока не будет прерван гидравлический контакт с источником увлажнения, материалы этой зоны будут находиться в состоянии капиллярного насыщения.

Выше располагается зона низкой скорости, характеризующаяся тем, что на каждом отдельно взятом участке скорость подвода влаги будет ниже скорости ее отвода. В рамках этой зоны, которую условно можно обозначать как «ненасыщенную», степень увлажнения материалов будет ниже максимальной. Еще выше будет располагаться воздушно-сухая зона, где капиллярная влага отсутствует, и где влажностный режим определяется только сорбционными процессами (Рисунок 3.14а). В подобной однородной конструкции можно выделить пять возможных типов влажностных профилей в формате контрольных горизонтальных сечений – зондажей (Рисунок 3.14б):

- Насыщенное состояние по всей глубине. Все материалы находятся в зоне насыщения;
- Влажность поверхностных слоев ниже максимальной, по мере удаления от поверхности влажность возрастает, достигая в определенной точке максимума. Поверхностные слои находятся в ненасыщенной зоне, более глубокие остаются в зоне насыщения;
- Влажность как поверхностных, так и более глубоких, слоев ниже максимальной. Все материалы сечения находятся в ненасыщенной зоне;

- Влажность поверхностных слоев находится в сорбционной зоне, влажность более глубоких материалов находится в увлажненном состоянии, но ниже максимального. Поверхностные слои находятся в воздушно-сухой зоне, более глубокие – в ненасыщенной;
- Влажность сечения по всей глубине находится в воздушно-сухом режиме.

Полученная схема распределения влажности в однородных конструкциях позволяет сделать следующие выводы:

- С увеличением глубины отбора пробы (с удалением от поверхности) влажность не может снижаться;
- С увеличением высоты отбора пробы (с удалением от источника увлажнения) влажность не может возрастать.

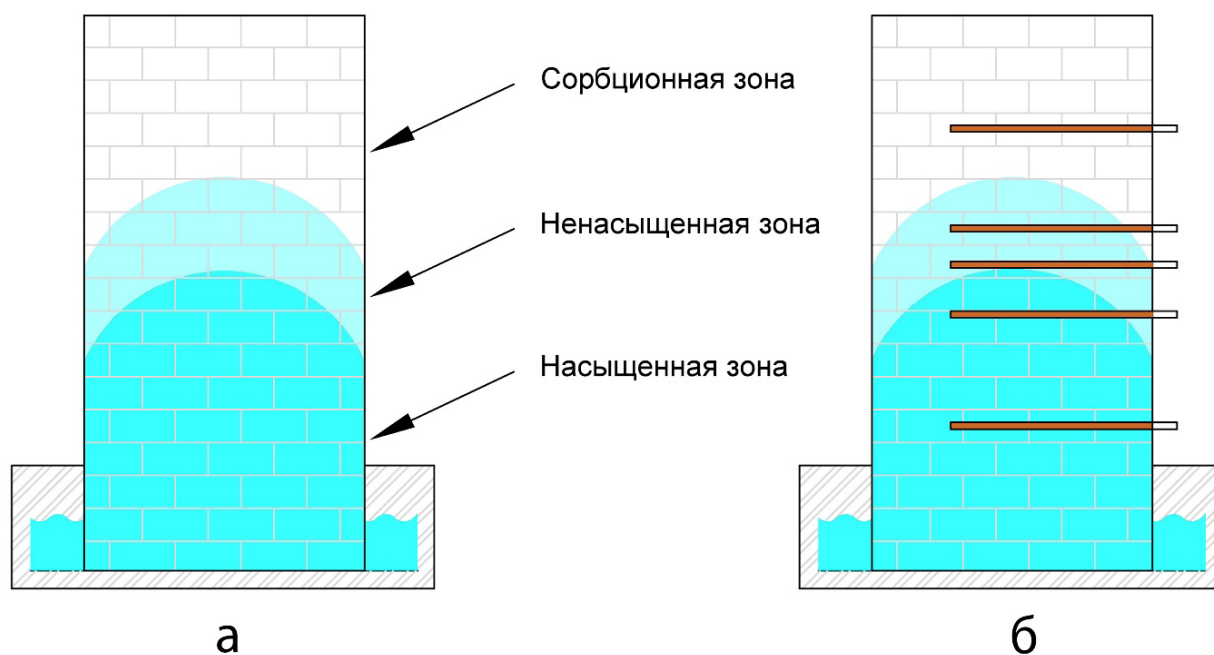


Рисунок 3.14 – Зоны увлажнения конструкции (а). Контрольные сечения – зондажи (б).

Результаты экспериментальных исследований материалов исторических конструкций показывают, что в условиях кладочной системы предложенные нами закономерности могут нарушаться. Так, если для однородной системы свойственно однонаправленное изменение влажности, то в условиях чередования материалов

динамика влажности в горизонтальном сечении кладки может носить ярко выраженный зигзагообразный характер (Рисунки 3.15, 3.16). Аналогичную неоднородность в распределении влажности можно наблюдать и по высоте, когда влажность материалов на более высокой отметке, т. е. находящихся дальше от источника увлажнения, может превышать влажность материалов, на более низкой отметке, т. е. находящихся ближе к источнику увлажнения. На Рисунках 3.17, 3.18 показано сопоставление влажности материалов в уровне пола с влажностью на высоте 1,1–1,3 метра.

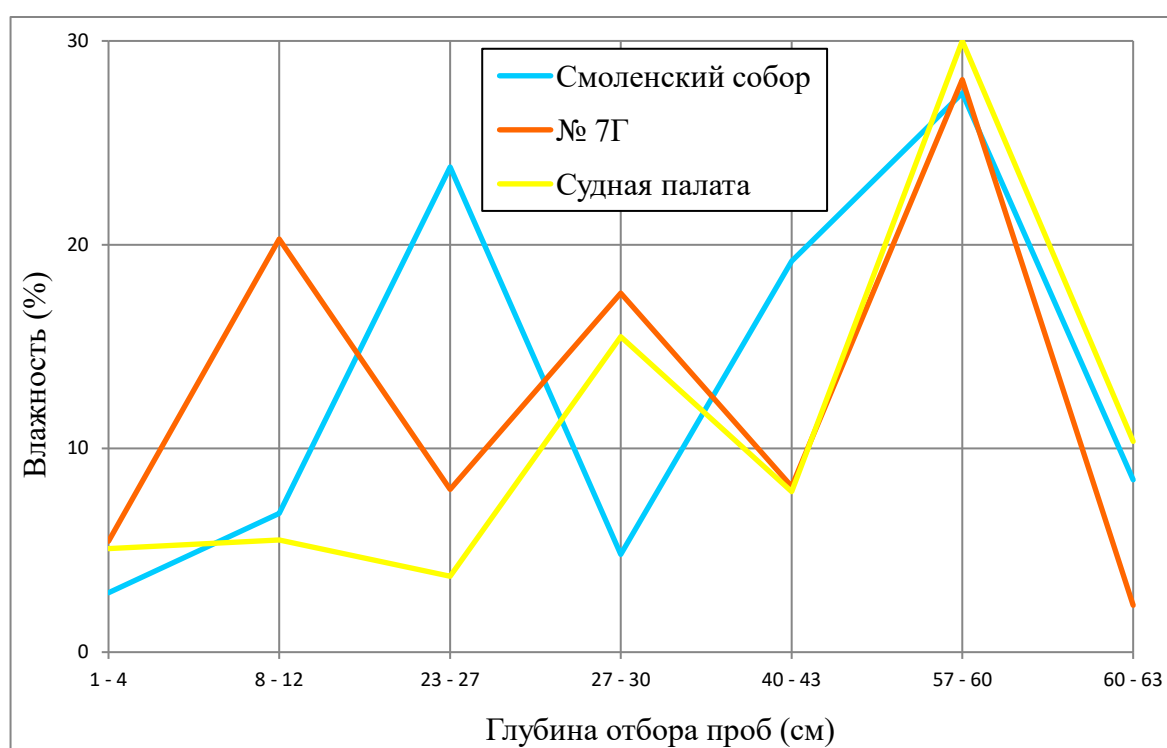


Рисунок 3.15 – Ход влажности в горизонтальных сечениях кладки конструкций Смоленского собора Новодевичьего монастыря, здания 7Г Духовной Академии СПб, Судной палаты Архангельского собора Московского Кремля

В Успенском соборе влажность материалов на высоте 1,1 метра от уровня пола в двух точках превышает влажность материалов в уровне пола: на глубине 18–24 см и 37–47 см. В троицком соборе в Яхrome влажность материалов на высоте 1,3 метра от уровня пола существенно выше влажности материалов в уровне пола по всей глубине отбора проб, за исключением поверхностного слоя.

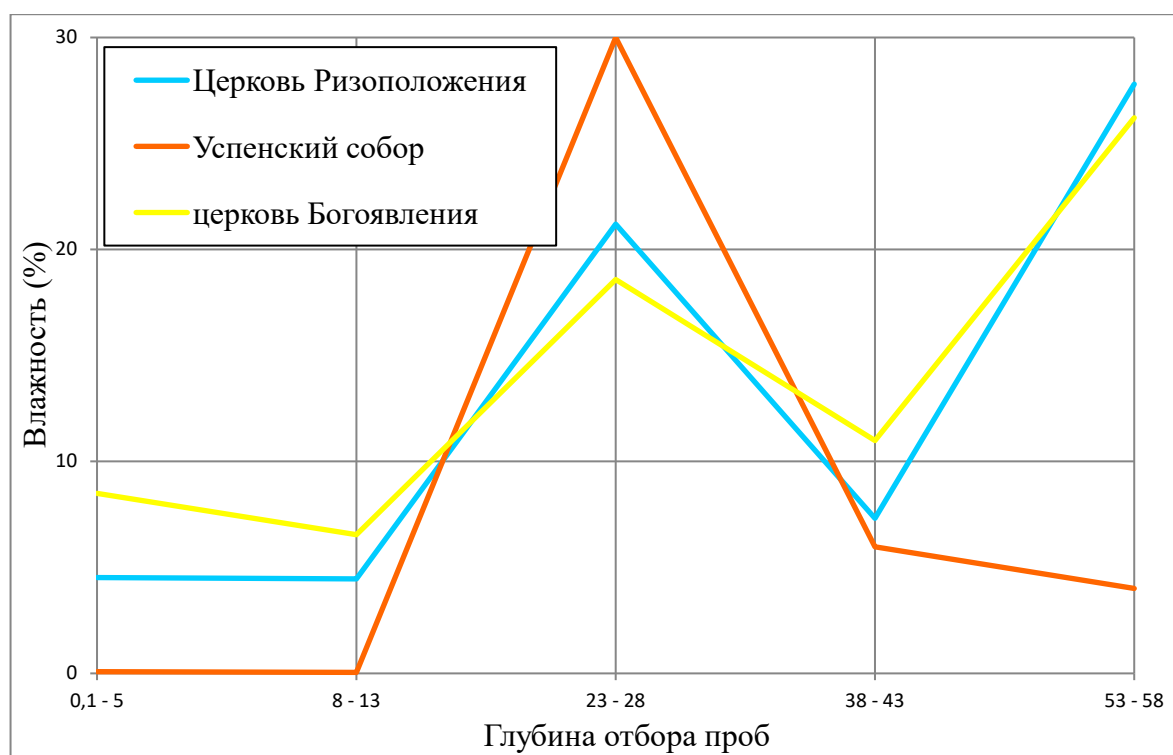


Рисунок 3.16 – Ход влажности в горизонтальных сечениях кладки конструкций церкви Ризоположения Московского Кремля, Успенского собора в Рязани, церкви Богоявления в Рязани

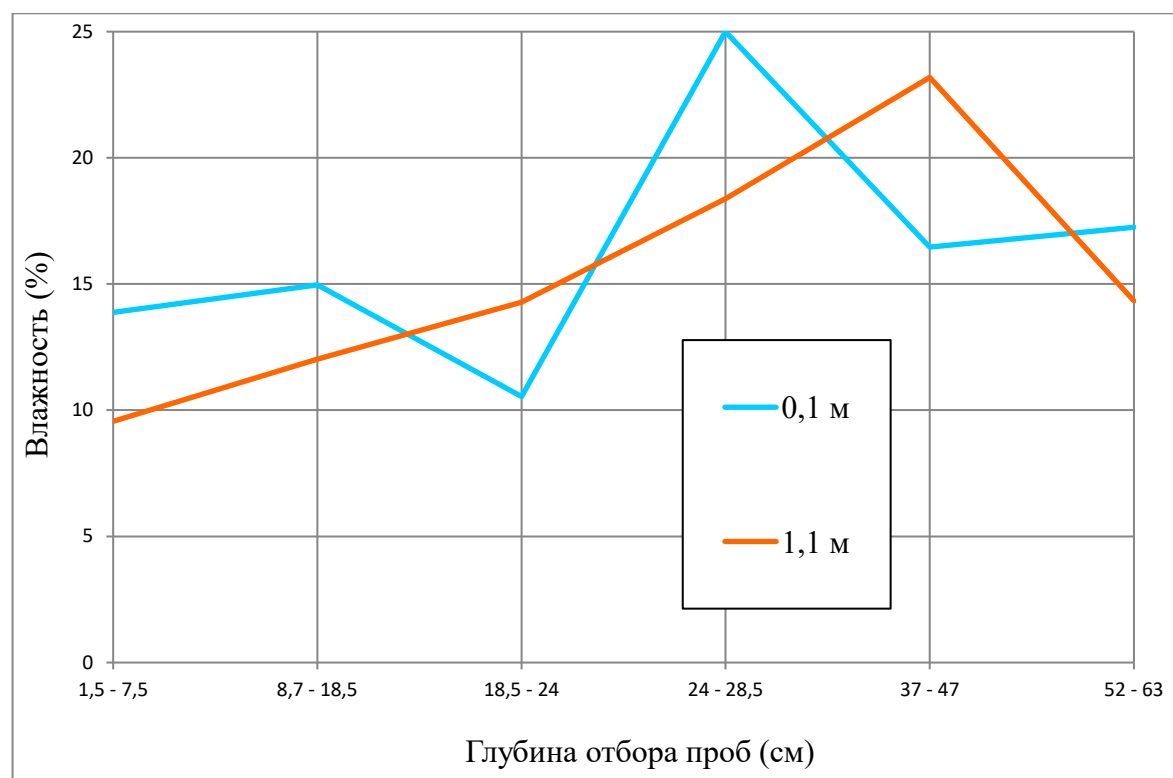


Рисунок 3.17 – Сопоставление влажности кладки Успенского собора Княгинина монастыря на разных высотах от уровня пола

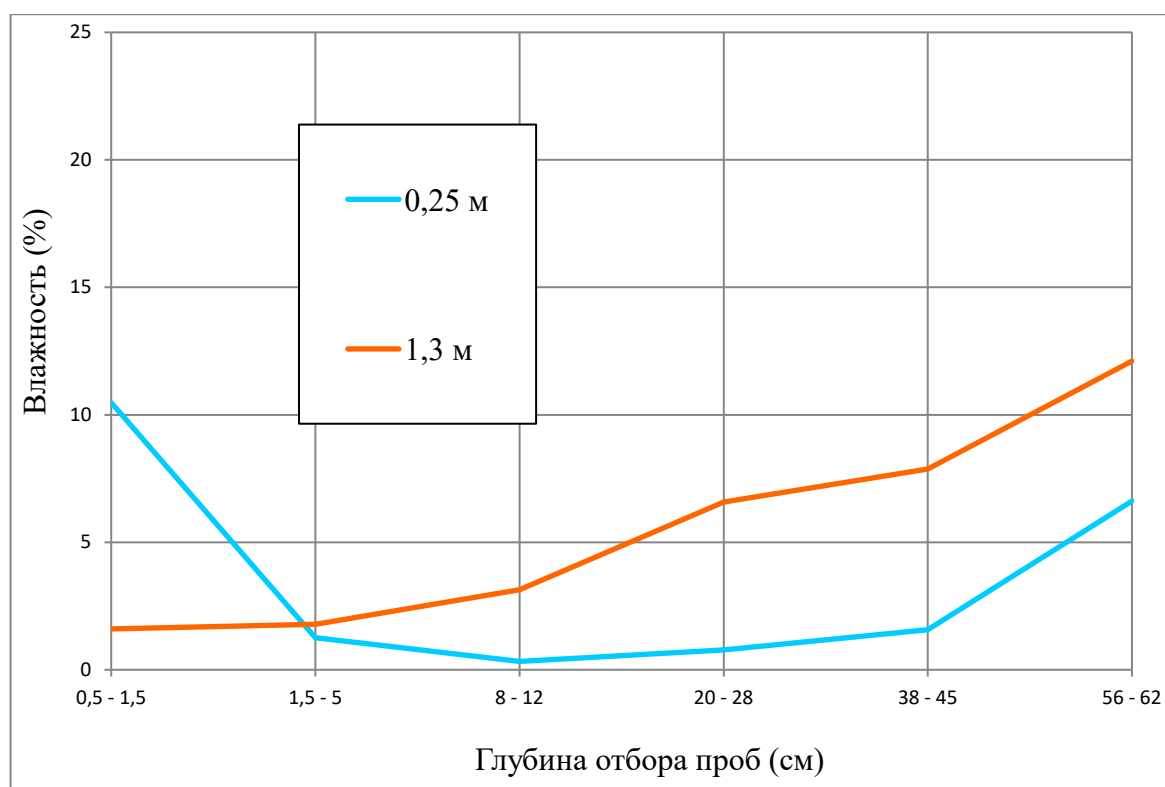


Рисунок 3.18 – Сопоставление влажности кладки Троицкого собора в Яхrome на разных высотах

При увеличении количества контрольных горизонтальных сечений по высоте сопоставление значений влажности материалов на разных высотах может приобретать еще более непредсказуемый характер. На Рисунках 3.19, 3.20 приведено сопоставление естественной влажности материалов по трем уровням на высоту до 1,5–2,5 метров от уровня пола.

Пример, относящийся к церкви Космы и Дамиана в Суздале показывает превышение влажности материалов на высоте 1,5 метра от уровня пола над влажностью материалов на высоте 0,8 метра от уровня пола на глубине 20–28 см и превышение влажности материалов на высоте 0,8 метров от уровня пола над влажностью материалов в уровне пола на финишной глубине 55–65 см. Пример Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря демонстрирует еще более парадоксальную картину. Влажность материалов не только на высоте 0,5 м от уровня пола, но также и на высоте 2,5 метров от уровня пола существенно превышает влажность материалов в уровне пола.

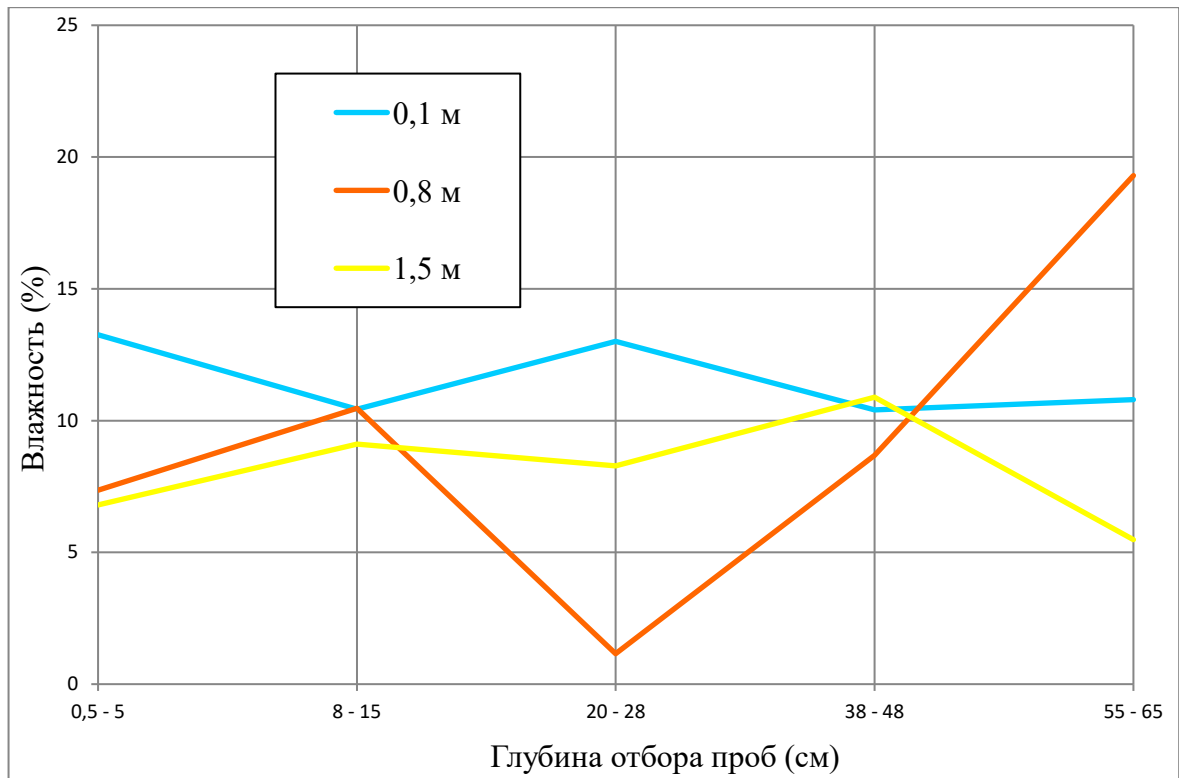


Рисунок 3.19 – Сопоставление влажности кладки Церкви Космы и Дамиана в Суздале на разных высотах от уровня пола

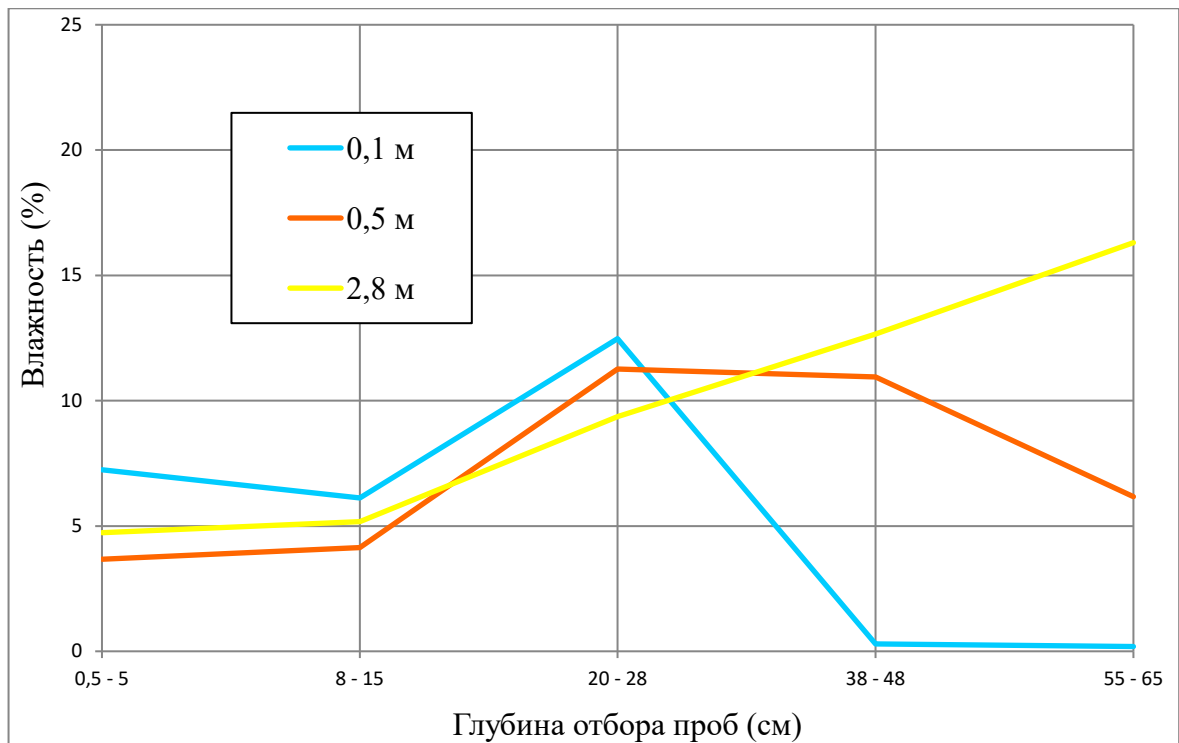


Рисунок 3.20 – Сопоставление влажности кладки Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря на разных высотах от уровня пола

Подобные «перекосы» могут возникнуть в процессе высыхания материалов с различными свойствами или развитой пустотностью, нередко встречающейся в кладке исторических конструкций. Пустотность, как правило, формируется на границе материалов, и ее размеры могут составлять от долей миллиметра до десятков сантиметров. Несколько характерных примеров, позволяющих наглядно представить возможные масштабы подобных явлений, приведены на Рисунках 3.21–3.23.

Указанные факторы существенно влияют на требования к отбору количества проб по глубине и высоте. Пробы из поверхностного слоя не могут дать представление о характере распределения влажности и физико-механических характеристик материалов по глубине конструкции. Для корректной интерпретации необходимо получение образцов, не только из наружной версты, но и из забутовки. Точно также, ориентация на данные только нижних частей стен при анализе состояния материалов исторических конструкций является недостаточной и может привести к недостоверным выводам. Для получения достоверной картины на каждом контрольном участке необходимо проводить отбор проб, не менее, чем на двух – трех уровнях по высоте.



Рисунок 3.21 – Успенский собор в Смоленске. Пустотность в кладке юго-восточной части алтаря на глубине 24,4 см



Рисунок 3.22 – Здание гостиницы Духовной Академии СПб. Пустотность в кладке центральной части северной стены на глубине 20,7 см



Рисунок 3.23 – Здание библиотеки Духовной Академии СПб. Пустотность в кладке западной части северной стены на глубине 37 см

3.3. Выводы по 3 главе

На основе экспериментальных результатов, полученных в процессе исследования материалов каменной кладки конструкций ОКН, разработаны принципы выбора схемы контрольных участков на объекте исследования. Несмотря на всю важность визуальных признаков увлажнения поверхности конструкций они не должны служить ограничением для выбора участков отбора проб. Более корректным представляется использовать сетку равномерно распределенных контрольных участков со следующими характеристиками:

- Включение всех ограждающих и основных внутренних конструкций;
- Каждая из конструкций или условно выделенных зон представлена не менее, чем 2–3 участками;
- Каждый участок содержит 2–3 горизонтальных сечения – зондажа по высоте;
- Каждое горизонтальное сечение – зондаж имеет глубину не менее 40–60 см, зависящую от толщины стены на исследуемом участке.

Сформулированные принципы легли в основу получения образцов для лабораторных испытаний, необходимых для оценки состояния материалов, методика которой представлена в главе 4.

Глава 4. Анализ и интерпретация данных результатов обследования состояния материалов конструкций ОКН

В главе 4 представлена оценка и интерпретация состояния материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН, базирующаяся на комплексном анализе результатов лабораторных исследований влажностных параметров и физико-механических свойств.

4.1. Влажностные характеристики материалов

Исследование состояния материалов начинали с анализа влажностных характеристик проб в рамках контрольных горизонтальных сечений – зондажей кладки объекта, что позволяло определить степень насыщения и источник увлажнения материалов. Определение естественной влажности W (степени увлажнения материала в кладке) является недостаточным для полноценной характеристики влажностного режима анализируемого участка. Связано это с тем фактором, что в зависимости от характера пористой структуры одно и то же количество влаги может изменять состояние материала от воздушно-сухого до водонасыщения [65]. Корректная интерпретация возможна только при сопоставлении показателя естественной влажности (W) со значениями водопоглощения (S) и максимальной сорбционной влажности (A_{98}).

Значение водопоглощения показывает максимальное количество влаги, способное удерживаться материалом при атмосферном давлении и позволяет оценить предел капиллярного насыщения. Соответственно, одни и те же значения естественной влажности могут интерпретироваться по-разному, в зависимости от величины значений водопоглощения материала. На Рисунке 4.1 приведено распределение естественной и нормализованной относительно водопоглощения (относительной) влажности материалов по глубине для двух сечений Судной палаты Архангельского собора Московского Кремля. В обоих сечениях присутствуют значения естественной влажности 6%, в случае сечения № 1 на

глубине 38–45 см, в случае сечения № 9 – на глубине 20–27 см. Однако в первом случае значения естественной влажности приближаются к значениям насыщения ($S = 6,5\%$) и при выражении относительно водопоглощения достигают 95%. Во втором случае значение естественной влажности существенно меньше предела насыщения ($S = 16,8\%$) и при выражении относительно водопоглощения составляет лишь 35%.

В отдельных случаях нормализация значений естественной влажности относительно значений водопоглощения существенно меняет характер распределения влажности в анализируемом сечении, что является определяющим с точки зрения последующей интерпретации результатов. На Рисунке 4.2 приведено сопоставление естественной и относительной влажности материалов в горизонтальном сечении западной части северной стены Георгиевского собора в Юрьеве-Польском. Анализ результатов только по естественной влажности показывает возрастание показателей на участке 23–36 см с пиком на 32–36 см, тогда как остальные участки остаются увлажненными незначительно. Анализ с учетом значений водопоглощения показывает общее возрастание влажности материалов глубже 23 см с незначительным снижением на финишной глубине 45–52 см. Таким образом, в контрольном горизонтальном сечении выделяются две зоны влажности, поверхностная – относительно сухая и более глубокая – переувлажненная. Подобное разделение позволяет выявить причину аккумуляции влаги – макротрещина, расположенная на глубине 20 см, схематически обозначенная на рисунке черной полосой.

На Рисунке 4.3 приведено сопоставление естественной и относительной влажности материалов в горизонтальном сечении южной части западной стены Смоленского собора Новодевичьего монастыря. Анализ результатов только по естественной влажности показывает возрастание влажности на участке 35–61 см с пиком на 58–61 см. Анализ с учетом значений водопоглощения показывает основной перепад влажности на участке 28–35 см с пиком на глубине 35–42 см. Подобное распределение, в отличие от распределения по естественной влажности, является более объяснимым, поскольку на глубине 28 см была зафиксирована

макротрещина, которая, по всей вероятности, и явилась причиной аккумуляции влаги на участке 35–42 см. Приведенные примеры показывают, что использование относительной влажности материалов (нормализации естественной влажности относительно водопоглощения) позволяет проводить более корректный анализ данных, с точки зрения понимания причин, приведших к формированию того или иного типа влажностного режима участка.

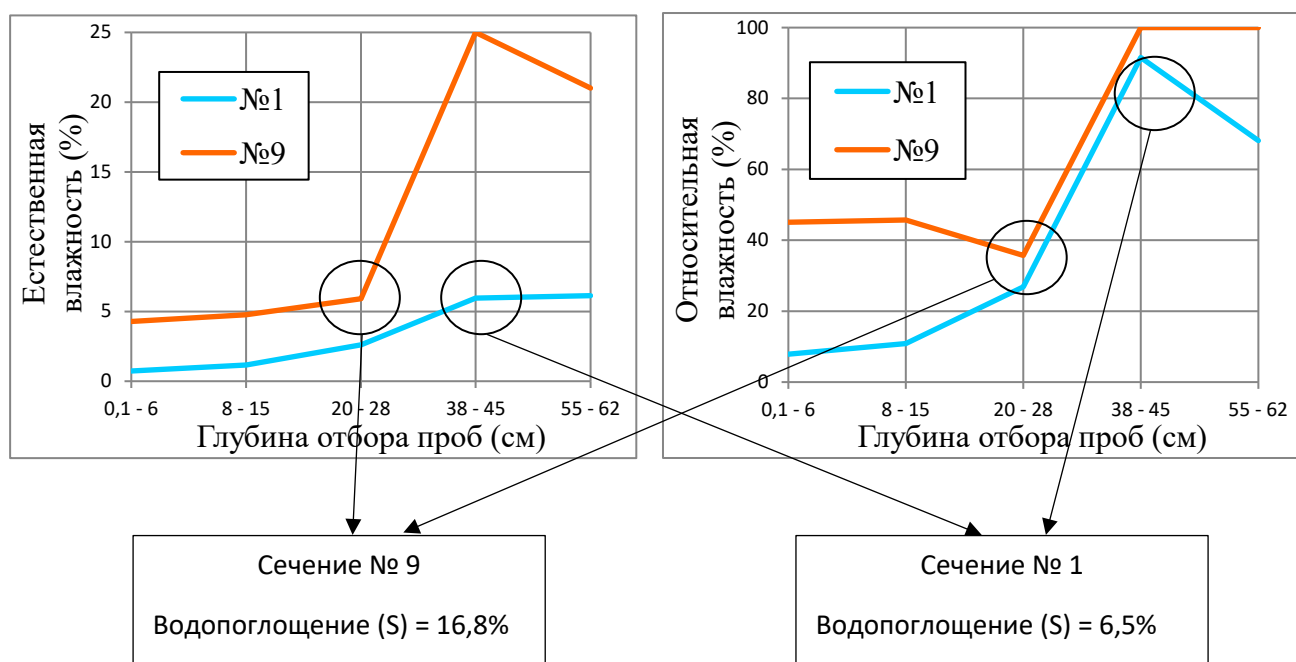


Рисунок 4.1 – Естественная и относительная влажности материалов сечений № 1 и 9 конструкций Судной палаты Архангельского собора Московского Кремля

Максимальная сорбционная влажность подразумевает влажность, которую материал приобретает, входя в равновесие с давлением водяного пара при относительной влажности воздуха 100%. Поскольку точное определение значений сорбции при 100% относительной влажности достаточно затруднительно [286], в качестве максимальной сорбционной влажности использовались значения, приобретенные материалом в условиях 98%-ной относительной влажности воздуха (A_{98}). Сопоставление естественной влажности материалов (W) со значениями максимальной сорбционной влажности (A_{98}) базируется на понятии «нормальной» влажности, сформулированной в [50]. Сопоставление позволяет определить, к какому типу увлажнения, сорбционному или сверхсорбционному, относится

анализируемый участок. Если значения W ниже значений A_{98} , то материал находится в сорбционном (воздушно-сухом) состоянии, если выше – то присутствуют дополнительные, помимо влаги из воздуха, источники увлажнения. Для исторических конструкций такое ранжирование является необходимым по причине возможной высокой сорбционной активности материалов. На Рисунках 4.4–4.6 приведены различные варианты соотношения естественной и сорбционной влажности на примере конструкций Георгиевского собора в Касимове.

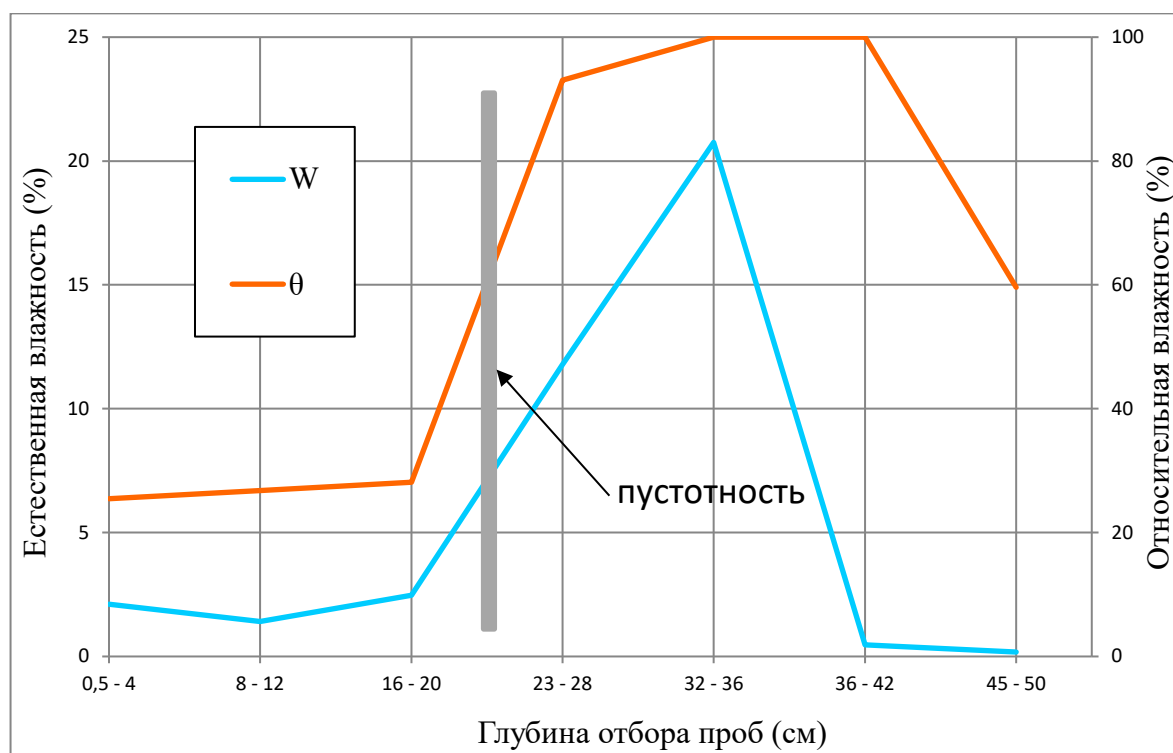


Рисунок 4.2 – Соотношение естественной (W) и относительной (θ) влажности в контрольном сечении западной части северной стены Георгиевского собора в Юрьеве-Польском

В контрольном сечении, относящемся к юго-восточной части алтаря (Рисунок 4.4) значения естественной влажности выше значений сорбционной влажности по всей глубине, за исключением поверхностного слоя, что говорит о сверхсорбционной (капиллярной) природе влажности и, соответственно, наличии дополнительных источников увлажнения. В контрольном сечении, относящемся к одному из центральных столбов алтарной части (Рисунок 4.5), наоборот, значения сорбционной влажности существенно превышают значения естественной

влажности по всей глубине отбора проб, достигая на отдельных участках значений водопоглощения. Отсюда можно заключить, что на данном контрольном участке материалы способны полностью насыщаться влагой из воздуха, без дополнительных источников увлажнения. В контрольном сечении, относящемся к центральной части южной стены (Рисунок 4.6), сорбционная влажность поверхностных слоев до 28 см превышает естественную влажность, тогда как на более глубоких участках естественная влажность начинает превышать сорбционную, указывая тем самым на появление дополнительных источников увлажнения. Поскольку присутствие в материалах капиллярной влаги требует проведения мероприятий по ее удалению, то понимание природы влажности является определяющим фактором при разработке рекомендаций по нормализации влажностного режима.

Для удобства анализа относительная влажность материалов (θ) дополнительно разделялась на две составляющие: сорбционную (влагу из воздуха) и капиллярную (влагу из дополнительных источников увлажнения). Для получения сорбционной составляющей (θ_s) значение максимальной сорбционной влаги (A_{98}) выражали в процентном отношении к значениям водопоглощения (S):

$$\theta_s = A_{98} / S * 100. \quad (4.1)$$

Для получения относительной капиллярной влажности материалов (θ_c) полученную величину вычитали из общей относительной влажности (θ):

$$\theta_c = \theta - \theta_s. \quad (4.2)$$

На Рисунке 4.7 показано распределение относительной (нормализованной) влажности материалов в контрольном сечении юго-восточной части Спасской церкви в Киово в Лобне. Влажность возрастает с 55% в штукатурном слое до 90% в поверхностном слое кирпича на глубине 2,3–7,4 см, затем снижается до 36% в центральной части зондажа и вновь возрастает до 79% на глубине 29,5–45 см.

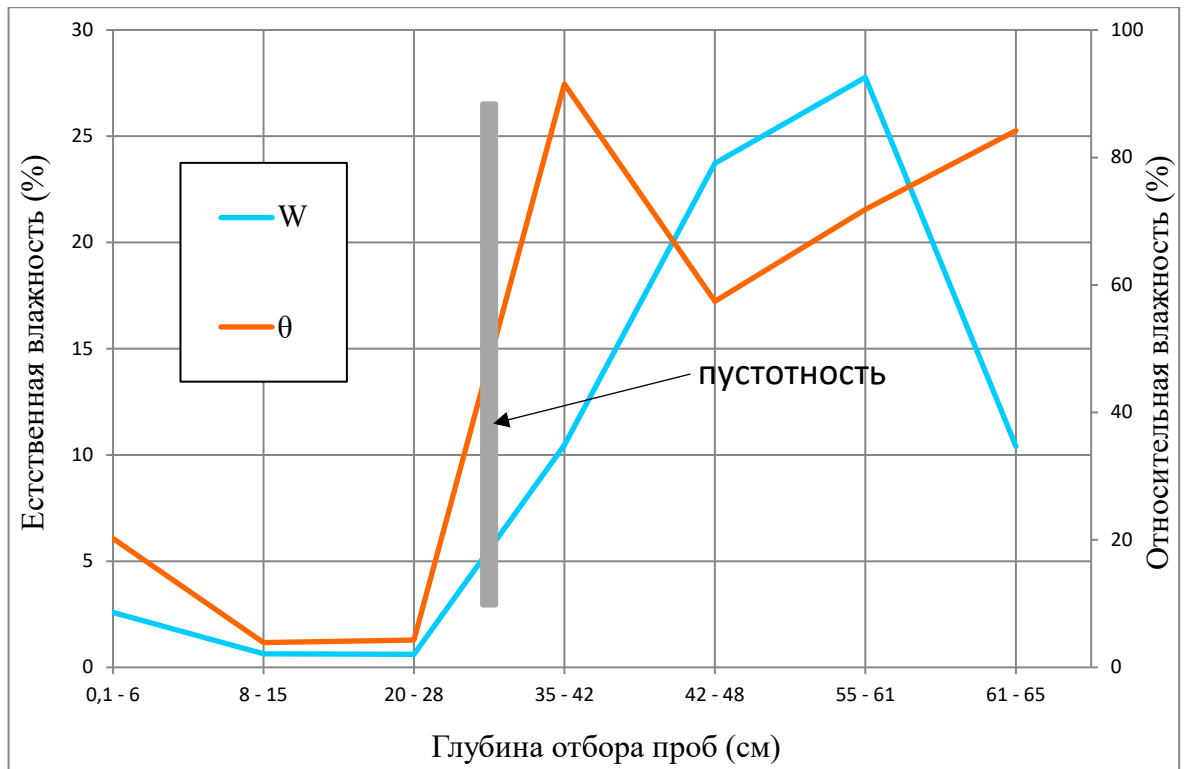


Рисунок 4.3 – Соотношение естественной (W) и относительной (θ) влажности сечения южной части западной стены подклета Смоленского собора Новодевичьего монастыря

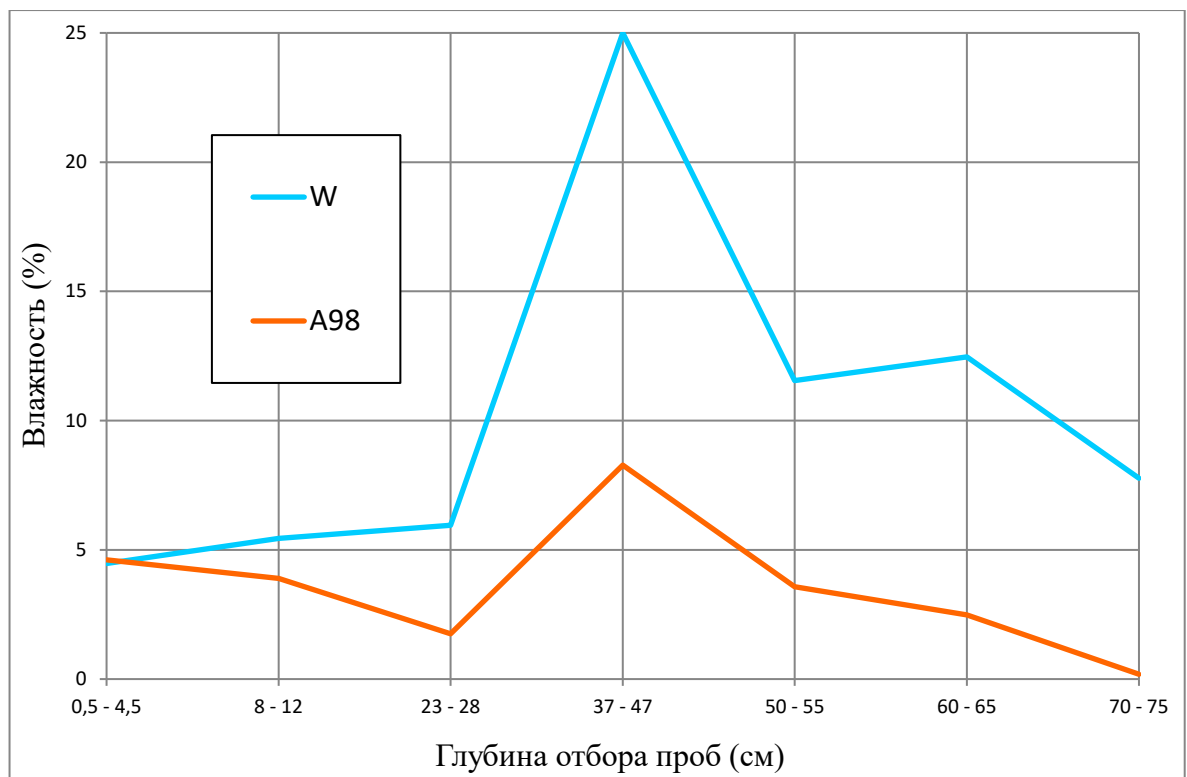


Рисунок 4.4 – Сопоставление естественной и максимальной сорбционной (A_{98}) влажности контрольного сечения конструкций юго-восточной части алтаря Георгиевского собора в Касимове

Как можно видеть, влажность штукатурки полностью определяется сорбционной составляющей, тогда как влажность остальных материалов сечения, в основном, определяется капиллярной составляющей, поскольку сорбционная влажность не поднимается выше 3,3%. Это позволяет предположить, что снижение влажности на глубине 18,5–45 см связано с процессом высыхания после завершения сезонного увлажнения. Аккумуляция же влаги на глубине 2,3–18,5 см, по всей вероятности, связана с резким перепадом свойств между штукатуркой и кирпичом.

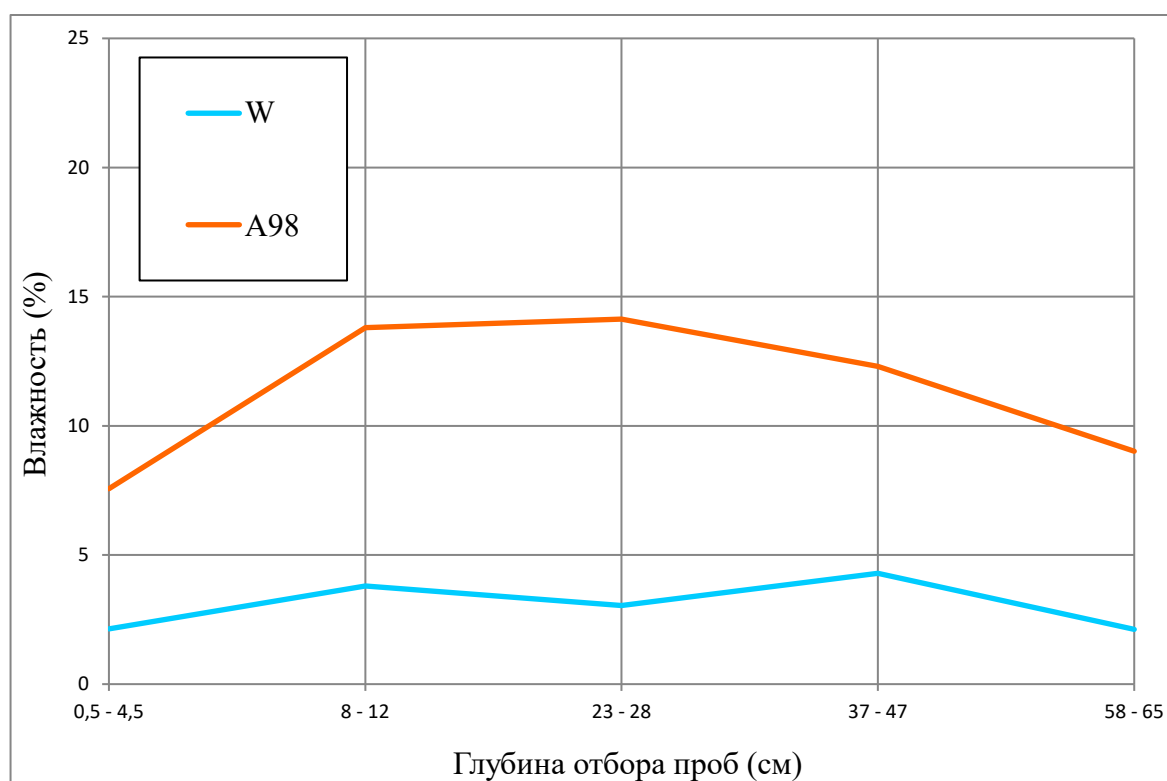


Рисунок 4.5 – Сопоставление естественной и максимальной сорбционной (A_{98}) влажности контрольного сечения центрального столба конструкций алтарной части Георгиевского собора в Касимове

Обратная картина наблюдается на Рисунке 4.8, представляющем распределение влажности в контрольном сечении центральной части северной стены Успенского собора в Смоленске. Влажность поверхностных слоев до 43 см изменяется в диапазоне 7 – 50%, далее наблюдается резкое возрастание до 90–100% на глубине 43–58 см, а затем снижение до 68% на глубине 58–62 см.

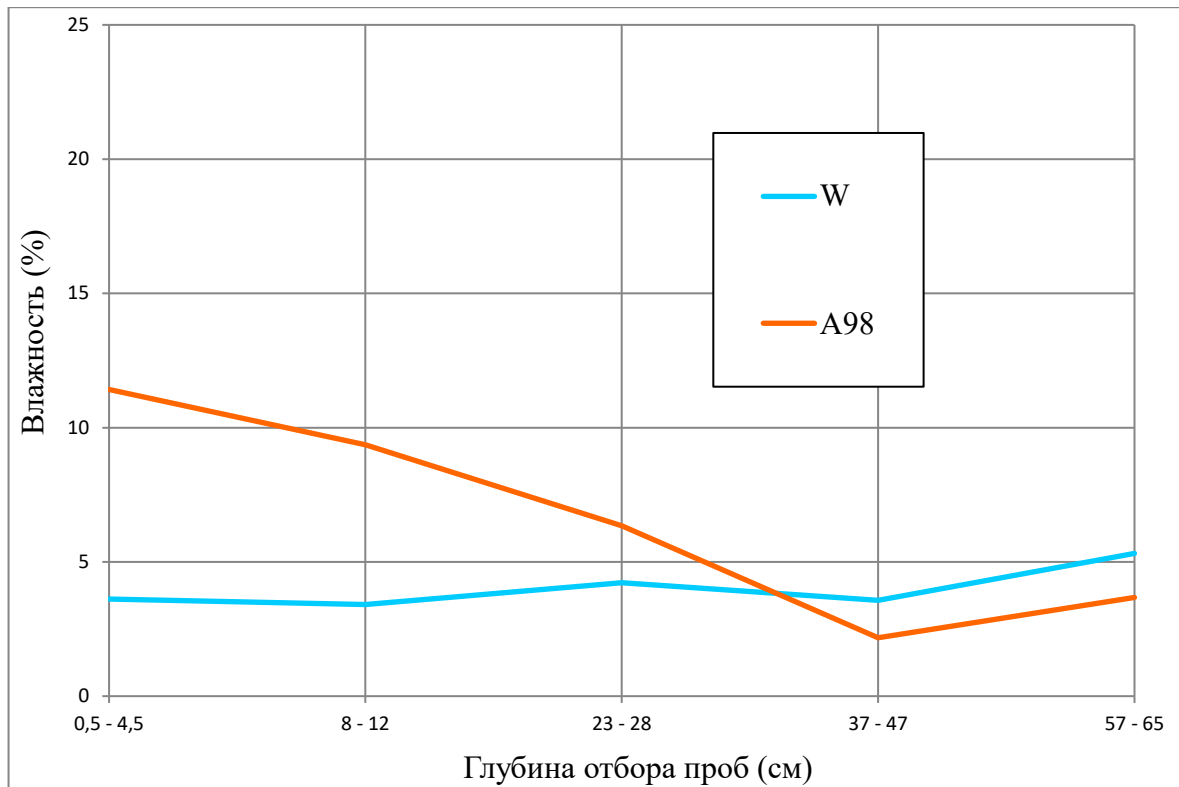


Рисунок 4.6 – Сопоставление естественной и максимальной сорбционной (A_{98}) влажности контрольного сечения центральной части южной стены Георгиевского собора в Касимове

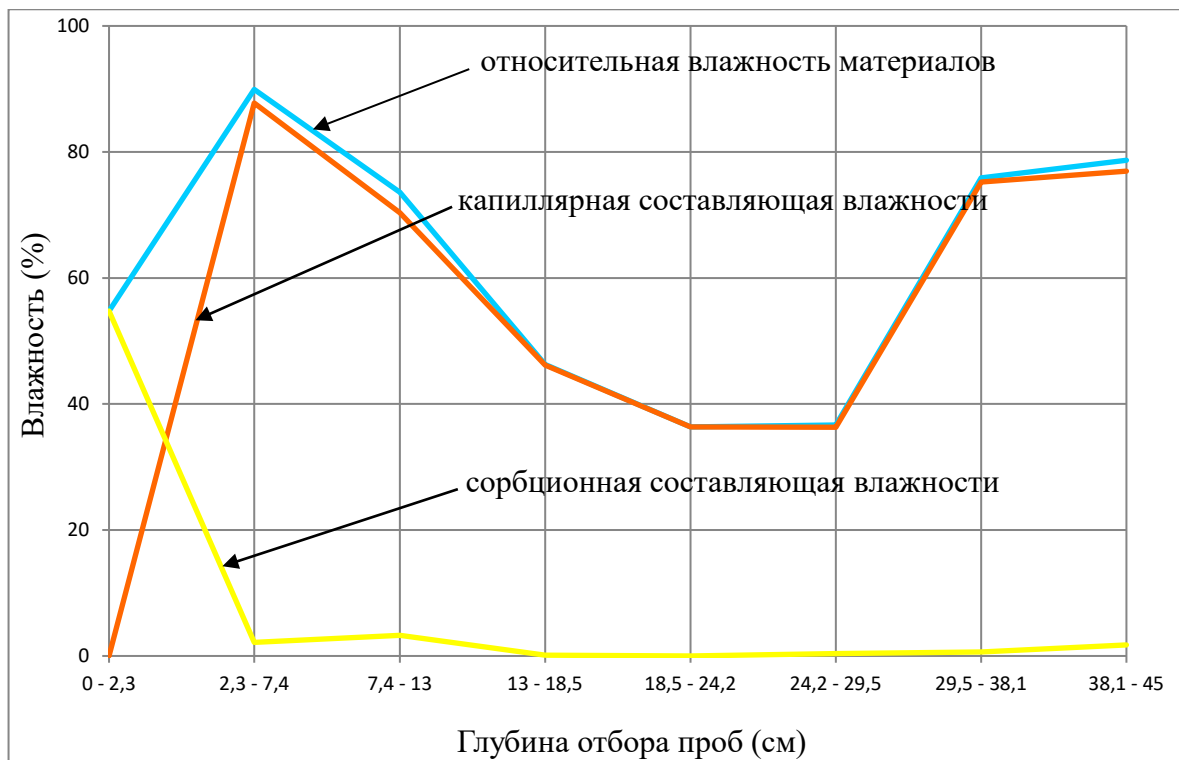


Рисунок 4.7 – Спасская церковь в Киове в Лобне. Относительная влажность материалов контрольного сечения юго-восточной части с разделением на капиллярную и сорбционную составляющие

Однако возрастание влажности определяется сорбционной составляющей, т. е. связано не с поступлением влаги от источника увлажнения, а гигроскопичностью материалов. Поскольку зона насыщения выделена макротрещинами, то можно предположить, что изначально ее формирование было связано с замедленной миграцией жидкости в процессе капиллярного увлажнения, способствующей возникновению зоны испарения и аккумуляции примесей. Со временем, аккумуляция примесей привела к значительной трансформации микроструктуры, повлекшей за собой существенное возрастание сорбционных характеристик. В результате, на момент исследования, высокая степень увлажнения материалов определялась уже не капиллярной влагой и дополнительными источниками увлажнения, а лишь влагой из воздуха. В связи с этим, более показательным, в данном случае, является материал с финишной глубины 58–65 см, где сорбционная и капиллярная составляющая распределяются, примерно, в равных долях, что говорит о наличии остаточного капиллярного увлажнения, носящего сезонный характер.

Приведенные примеры демонстрируют, что использование относительной влажности материалов с ее дополнительным разделением на две составляющие – капиллярную и сорбционную – позволяет получить более полную картину влажностных характеристик.

При увлажнении отдельного материала (отдельной пробы), можно выделить три возможные состояния: состояние увлажнения при наличии гидравлического контакта с источником увлажнения (степень насыщения приближается к максимальной), состояние высыхания при отсутствии гидравлического контакта с источником увлажнения (степень насыщения ниже максимальной, но выше сорбционной), воздушно-сухое состояние, когда влажность материала определяется давлением водяного пара (степень насыщения ниже максимальной сорбционной).

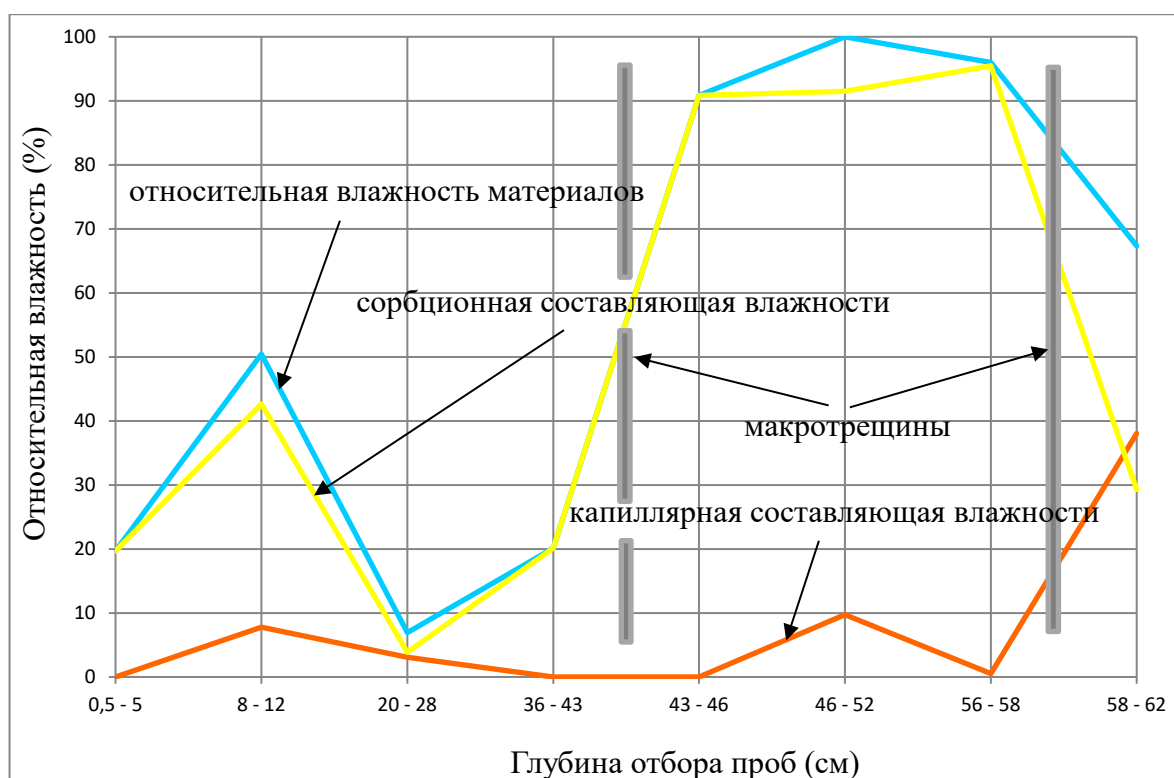


Рисунок 4.8 – Успенский собор в Смоленске. Относительная влажность материалов сечения центральной части северной стены с разделением на капиллярную и сорбционную составляющие

Интерпретация распределения влажности по контрольному горизонтальному сечению — зондажу, в целом, существенно затрудняется из-за возможной неоднородности и развитой внутренней пустотности материалов кладки исторических конструкций [67]. В условиях сосуществования материалов с разными микроструктурными характеристиками, пронизанных развитой сетью микрощелей и макротрещин, возможно сочетание на одном участке разных режимов влажности. Любая неоднородность может привести к затруднению или полной блокировке миграции жидкости. Произойти это может, как на стадии увлажнения, так и на стадии высыхания. На стадии увлажнения эффект локальной блокировки капиллярного поднятия влаги может вылиться, например, в то, что более крупнопористый материал останется сухим, тогда как окружающие его более мелкопористые материалы будут находиться в увлажненном состоянии. Пример дискретного увлажнения материалов контрольного сечения в центральной части

северной стены подклета Смоленского собора Новодевичьего монастыря приведен на Рисунке 4.9.

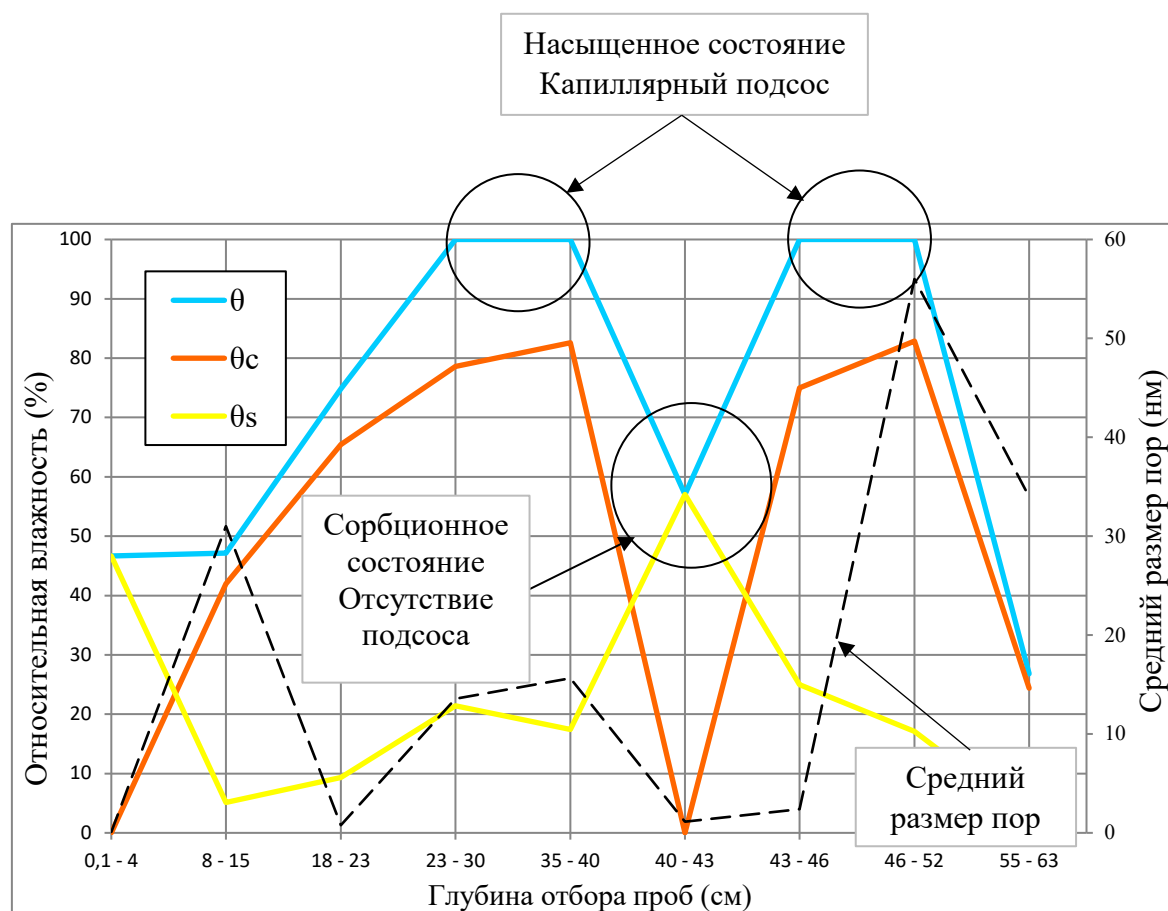


Рисунок 4.9 – Смоленский собор Новодевичьего монастыря. Дискретное увлажнение материалов контрольного сечения центральной части северной стены подклета

Участки кладки на глубине 23–40 см и 43–52 см находятся в состоянии насыщения, откуда можно сделать вывод об их гидравлическом контакте с источником увлажнения. При этом материалы, расположенные между этими двумя насыщенными участками на глубине 40–43 см остаются в сорбционном состоянии. Обращение к параметрам размера пор показывает, что на участке с сорбционными показателями значения среднего размера пор снижаются в сравнении с обоими соседними участками. Это говорит о том, что в случае наличия гидравлической связи данный участок должен был бы иметь степень увлажнения, как минимум, не меньшую, чем соседние участки, поскольку влага мигрирует из более крупных пор в более мелкие. Отсюда можно сделать вывод, что влажностный режим рассматриваемого участка формируется независимо, и сорбционное состояние

материала на участке 40–43 см является следствием не высыхания, а изначального отсутствия капиллярного подсоса.

На стадии высыхания, неоднородность кладки может проявиться, как в случае продолжающегося увлажнения отдельных участков стены, так и в случае высыхания контрольного сечения по всей глубине. В этом случае неоднородность будет определяться фактором отсоса влаги более мелкопористыми материалами из более крупнопористых. Высота подъема капиллярной влаги в материале – это всегда баланс между скоростью поступления / перемещения влаги в кладке и скоростью ее отвода / испарения. Соответственно, в случаях замедленной скорости отвода влаги с участков в глубине кладки, что происходит при сочетании материалов с разной структурой или при наличии внутри пустот, между соседними участками будет наблюдаться значительный градиент влажности.

На рисунке 4.10 приведено распределение влажности в контрольном сечении центральной части северной стены Спасской церкви в Киово в Лобне. На глубине 33–42 см можно видеть резкое возрастание относительной влажности материалов до 60%. Наличие капиллярной влаги показывает, что материалы данного сечения некоторое время назад находились в состоянии увлажнения, и наблюдаемая влажность является остаточной, будучи одним из этапов процесса высыхания. Рассмотрение параметров размера пор показывает, что участок повышенной влажности на глубине выделяется так же существенным (более порядка) перепадом размера пор. Отсюда можно сделать вывод, что возникновение влажной зоны связано с аккумуляцией здесь влаги в процессе высыхания.

Чередование мелко- и крупнопористых материалов, а также наличие развитой пустотности, приводит к тому, что распределение влажности в горизонтальном сечении в процессе высыхания принимает зигзагообразный характер. На Рисунке 4.11 приведено подобное разнонаправленное распределение влажности в контрольном сечении в северной галерее подклета Смоленского собора Новодевичьего монастыря.

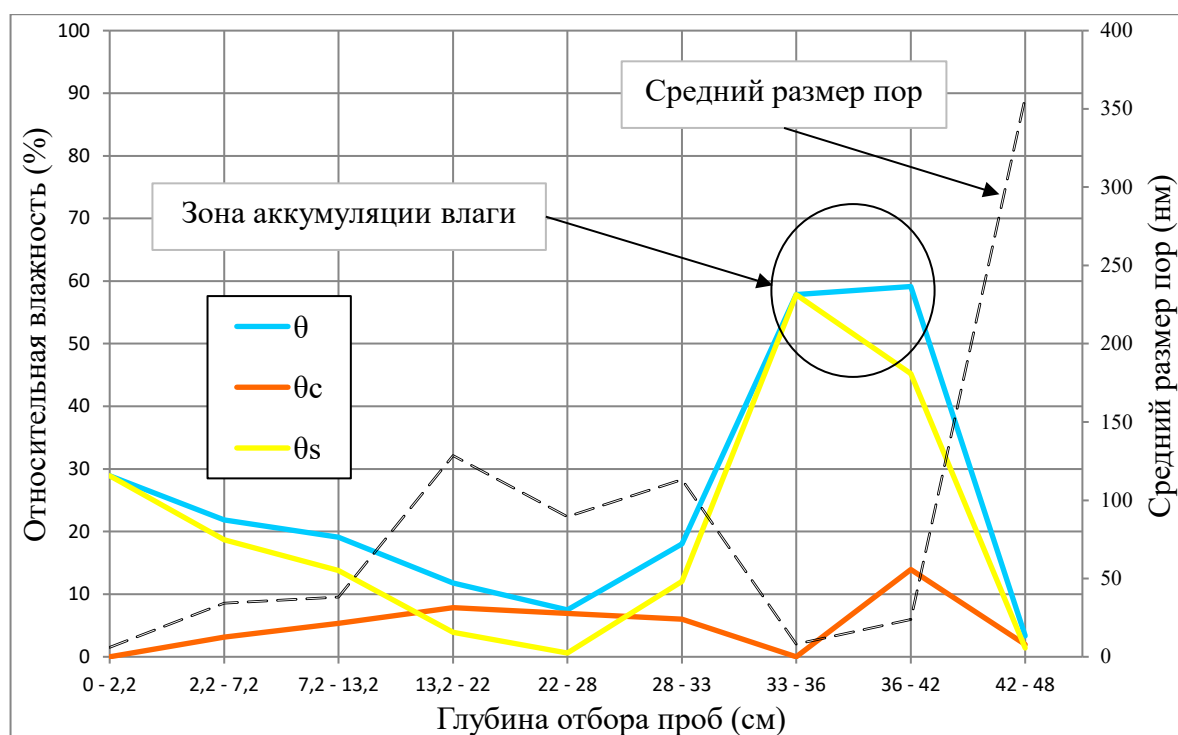


Рисунок 4.10 – Спасская церковь в Киове в Лобне. Аккумуляция влаги в материалах контрольного сечения центральной части северной стены в процессе высыхания

4.2. Сорбционные характеристики материалов

Присутствие сорбционной составляющей влаги может внести значительные изменения в характеристику влажностного состояния контрольного участка [67]. Важно отметить, что в случае материалов кладки исторических конструкций само понятие сорбционной влаги приобретает двойкий смысл. В новых однородных материалах количество сорбционной (включая и капиллярно-конденсационную) влаги при одинаковых химических свойствах поверхности является функцией размера пор. Однако в условиях старой кладки исторической конструкции возрастание в материале количества сорбционной влаги может иметь и другие причины, не связанные с реальным изменением геометрии пористой системы. Так, в случае концентрации солей в материале, его сорбционные характеристики будут определяться в первую очередь солями, гигроскопичность которых, как правило, значительно превышает гигроскопичность самого материала. С другой стороны, возможное накопление солей или микрообломков в порах приводит к их сужению,

что также способствует возрастанию гигроскопичности материала. Размер пор на границе с зоной испарения может уменьшиться до сорбционного, при том, что истинная геометрия порового пространства останется неизменной.

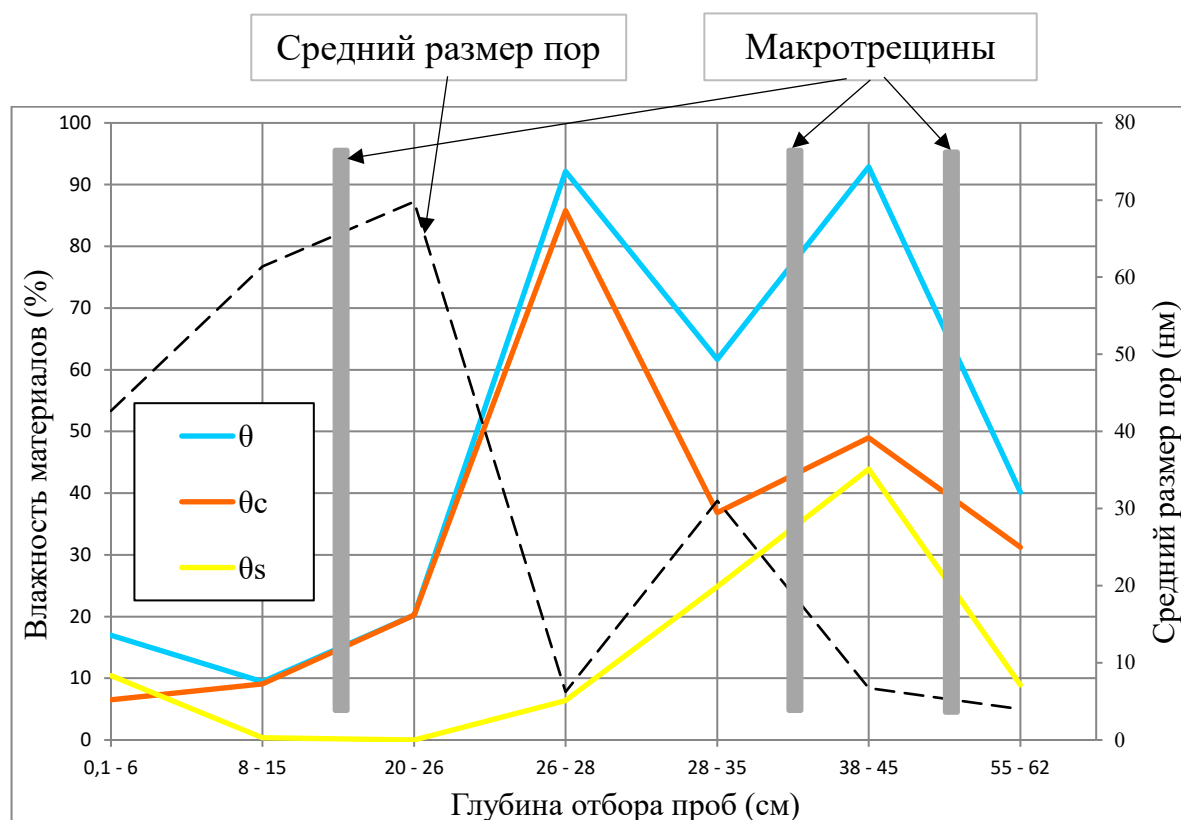


Рисунок 4.11 – Смоленский собор Новодевичьего монастыря. Зигзагообразное распределение влажности материалов контрольного сечения северной галереи подклета

Отсюда, возрастание сорбционных характеристик материалов контрольных участков может носить, как истинный (реальное изменение размеров пор), так и кажущийся (изменение за счет накопления примесей) характер [65]. Определить природу явления возможно только 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 более сорбционные характеристики материалов в кладке определялись аккумуляцией примесей на границе с зоной испарения. Чем меньше разница между первичной и вторичной сорбцией, тем более возрастание сорбционных характеристик материалов было связано с развитием сети

микротрещин. Изменение показателей степени микропористости, определяющихся максимальной сорбцией, свидетельствует об изначальном преобладании в материале крупных микропор более 60–70 нм, влияющих на капиллярный конденсат, тогда как изменение показателей удельной поверхности указывает на изначальное преобладание мельчайших микропор размером в несколько нанометров [106].

На Рисунке 4.12 показано сопоставление сорбционных показателей для контрольного сечения центральной части южной стены административного здания Мечети на Большой Татарской улице в Москве. На глубине 8,9–9,6 см наблюдаются значительные изменения, как по степени микропористости (со 100 до 15%), так и по удельной поверхности (с 56 до 1,4 м²/г). Отсюда можно сделать вывод, что на глубине 8,9 см расположена зона испарения. Поскольку здесь проходит граница кирпича и раствора, то возникновение зоны испарения может быть связано, как с разницей в пористости, так и с пустотностью. Если снижение показателей наблюдается по всей глубине контрольного сечения, то это свидетельствует о развитой пустотности анализируемого участка в целом (Рисунок 4.13). Изменение только одной из характеристик может акцентировать изменение только в рамках определенного диапазона пор.

На Рисунке 4.14 показано снижение только параметров степени микропористости, тогда как параметры удельной поверхности остаются неизменными. Это указывает на то, что в процессе очищения уменьшилось количество только крупных сорбционных пор, тогда как мельчайшие остались без изменения.

На рисунке 4.15 на глубине 35–40 см можно видеть двукратное падение значений удельной поверхности по результатам вторичной сорбции, тогда как значения степени микропористости остаются неизменными. Отсюда можно сделать вывод, что процесс очищения образцов, в основном, затронул мельчайшие поры и микротрещины.

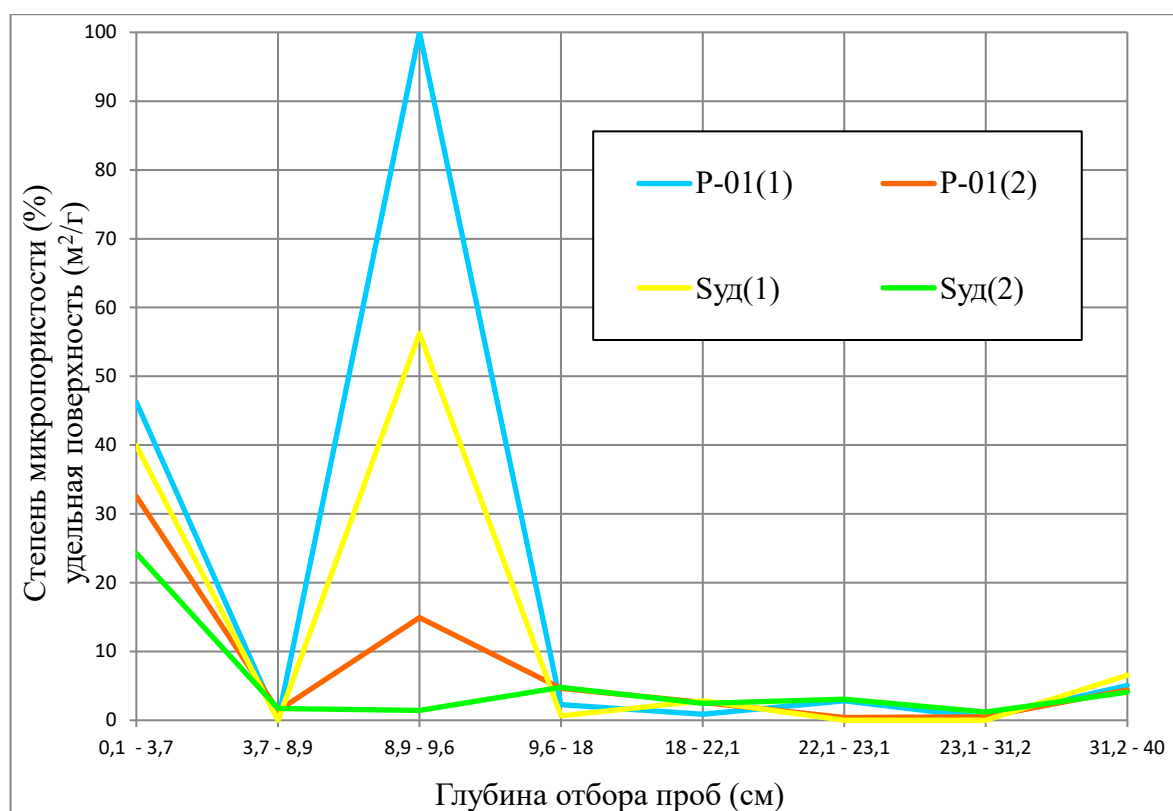


Рисунок 4.12 – Административное здание мечети на Большой Татарской улице в Москве. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении центральной части южной стены

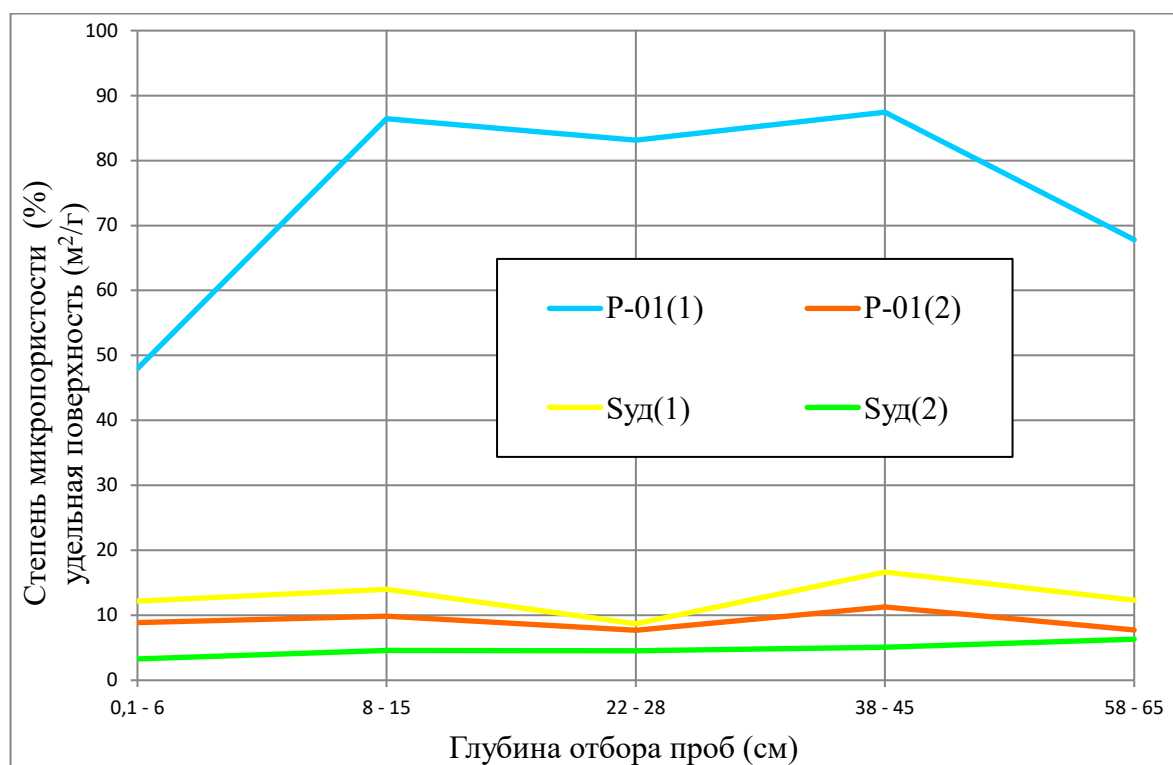


Рисунок 4.13 – Георгиевский собор в Касимове. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении центральной части западной стены

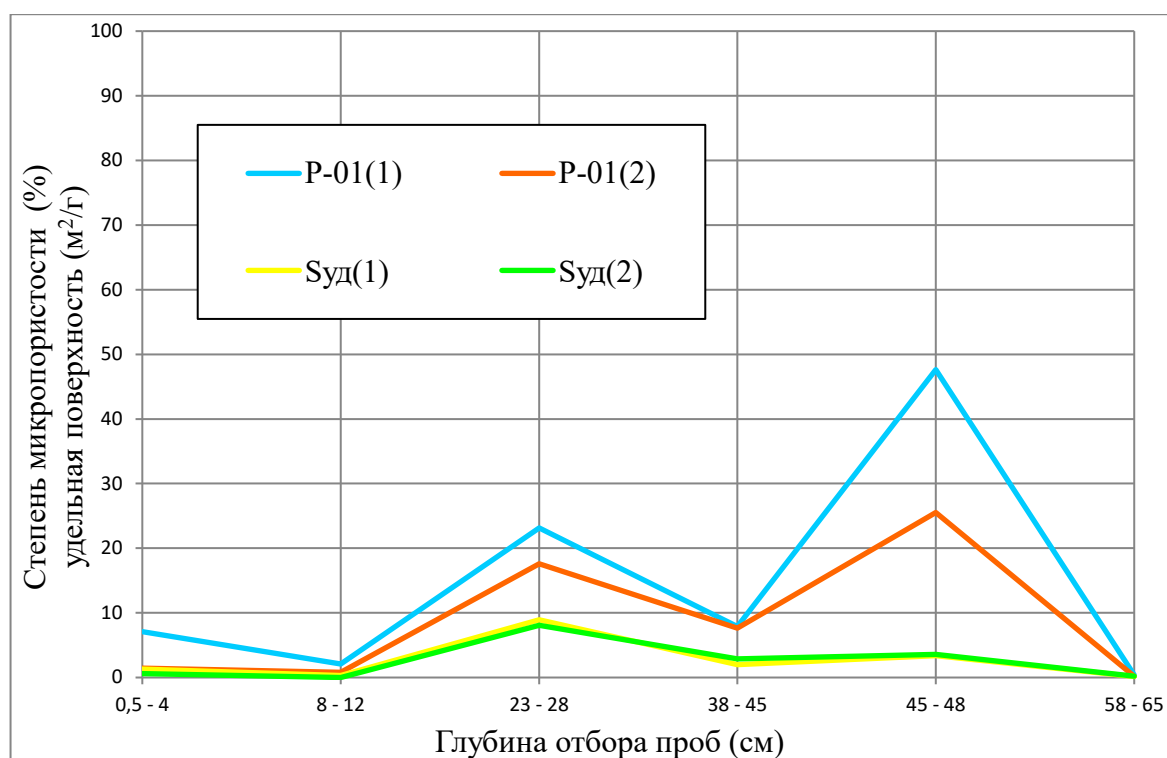


Рисунок 4.14 – Церковь Николы Мокрого в Ярославле. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении северной части алтаря

Возрастание показателей по данным вторичной сорбции указывает на то, что параллельно с очищением порового пространства от примесей во время лабораторных циклов увлажнения / высыхания происходит развитие процессов деструкции в виде формирования новых микротрещин, что свидетельствует об ослабленной структуре материалов. Формат новообразований также можно определить по тому, какие из характеристик возрастают.

На Рисунке 4.16 приведено резкое возрастание обеих характеристик в поверхностном слое, а также на глубине 26–32 и 55–62 см. Отсюда можно предположить массовый рост сети микротрещин во всем сорбционном диапазоне размеров пор. На Рисунке 4.17 происходит возрастание только значений удельной площади поверхности. Это означает активизацию начального процесса зарождений микротрещин, но не их расширения. На Рисунке 4.18, наоборот, наблюдается резкое возрастание только степени микропористости, тогда как удельная поверхность остается без изменения. Этот процесс сложнее объяснить.

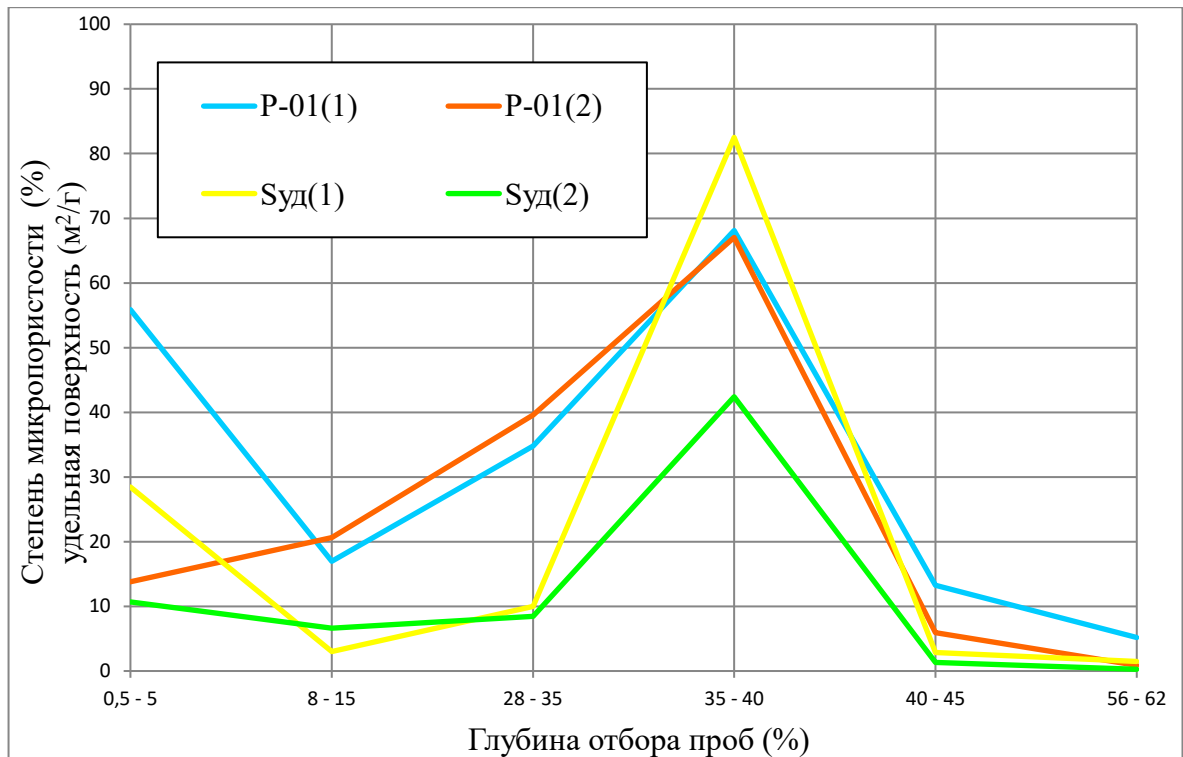


Рисунок 4.15 – Успенский собор в Смоленске. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении южной части алтаря

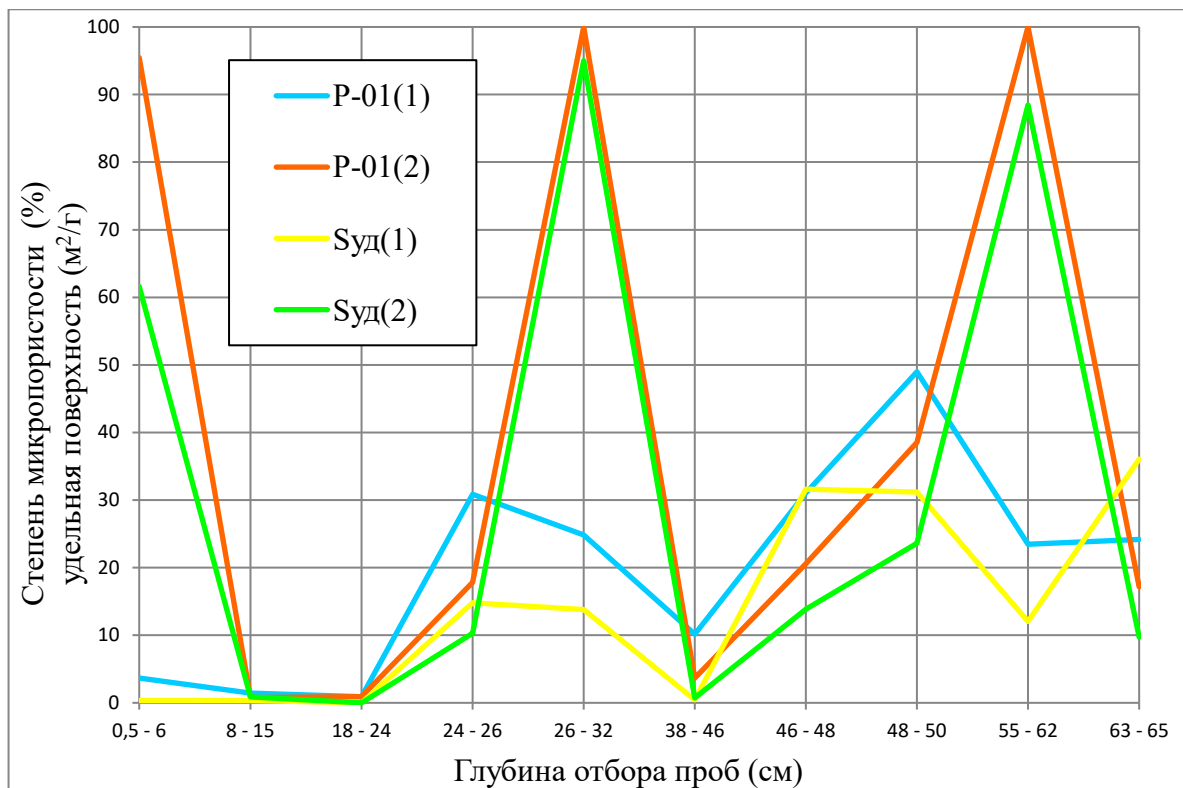


Рисунок 4.16 – Успенский собор в Смоленске. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении юго-восточной части четверика

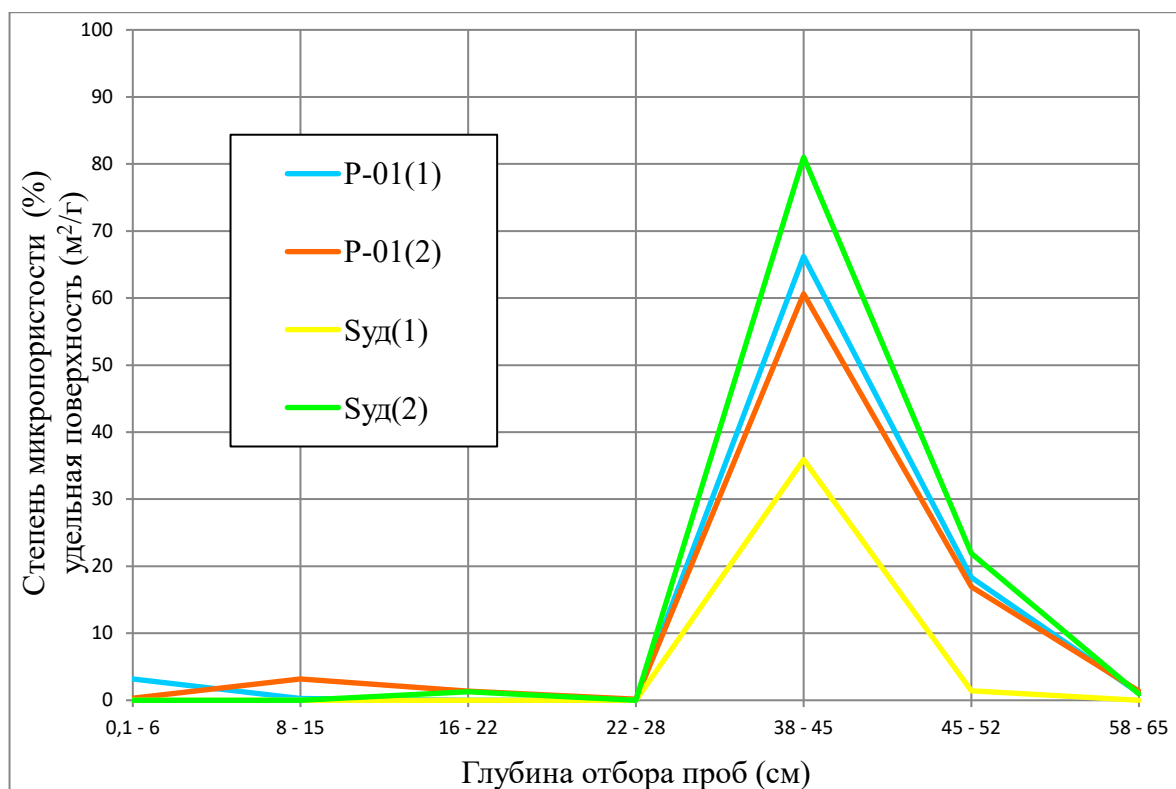


Рисунок 4.17 – Георгиевский собор в Юрьеве-Польском. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении западной части северной стены

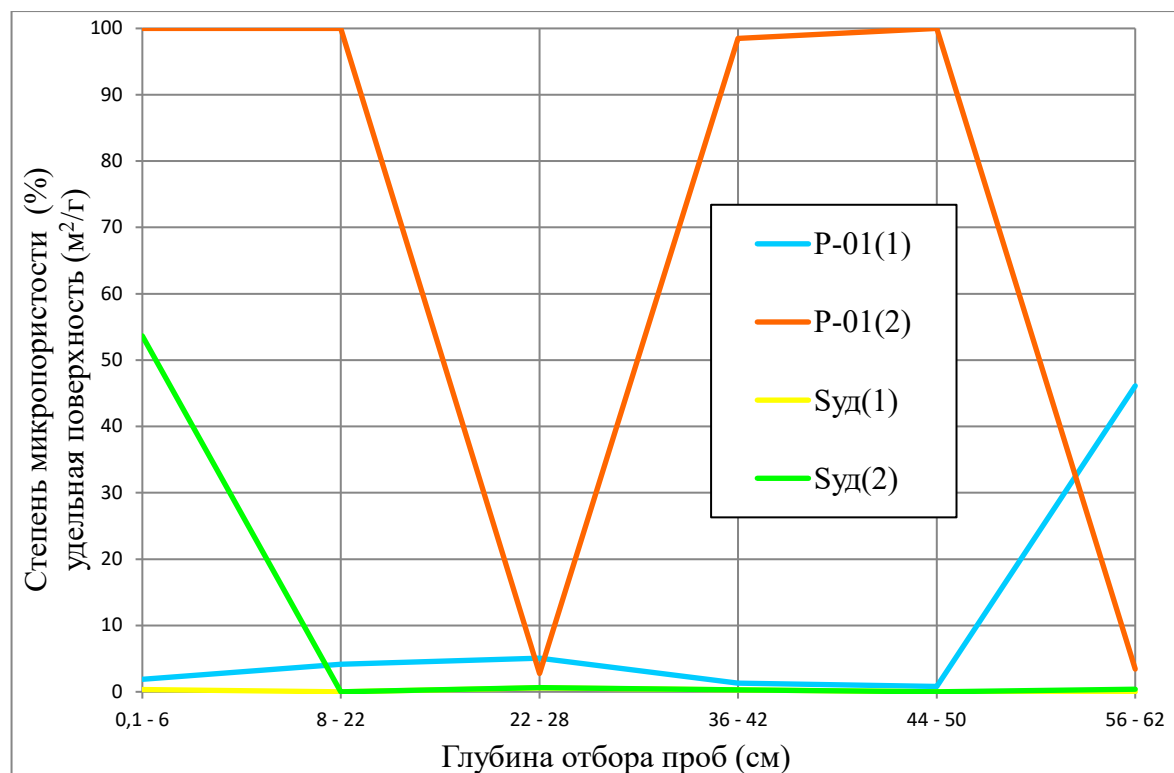


Рисунок 4.18 – Троицкий собор в Яхроме. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбции в контрольном сечении центральной части северной стены

Вероятнее всего, в данной ситуации имеет место не столько зарождение новых микротрещин, сколько развитие и расширение уже имеющихся. В любом случае сопоставление сорбционных характеристик до и после промывки образцов дает важнейшую информацию относительно закономерностей формирования влажностного режима материалов в анализируемом сечении и их состояния.

4.3. Физические свойства материалов

Следующим шагом полученная информация по распределению влаги и зон испарения в контрольных сечениях была сопоставлена с распределением по пористости и среднему размер пор. Это позволило определить участки, где возникновение зон испарения было вызвано перепадом в объеме и размере пор.

Резкие перепады объема пор на границе материалов встречаются относительно редко, однако в случае их появления они, как правило, приводят к значительным колебаниям влажности. На Рисунке 4.19 показано распределение влажности и пористости в контрольном сечении южной части алтаря Успенского собора Княгинина монастыря во Владимире. Наблюдаемый на глубине 28,7–32 см на границе кирпича и раствора скачок влажности объясняется скачком пористости более чем на 30%.

Однако более часто, перепады влажности определяются перепадом не в объеме, а в размерах пор, как показано на Рисунке 4.20, представляющем распределение влажности и среднего размера пор в контрольном сечении юго-западной части Успенского собора в Смоленске. Динамика влажности здесь противоположна по направленности динамике размера пор, поскольку влага аккумулируется на участках с более мелкими порами. Соответственно, аккумуляция влаги на участке 38–58 см объясняется резким снижением среднего размера пор.

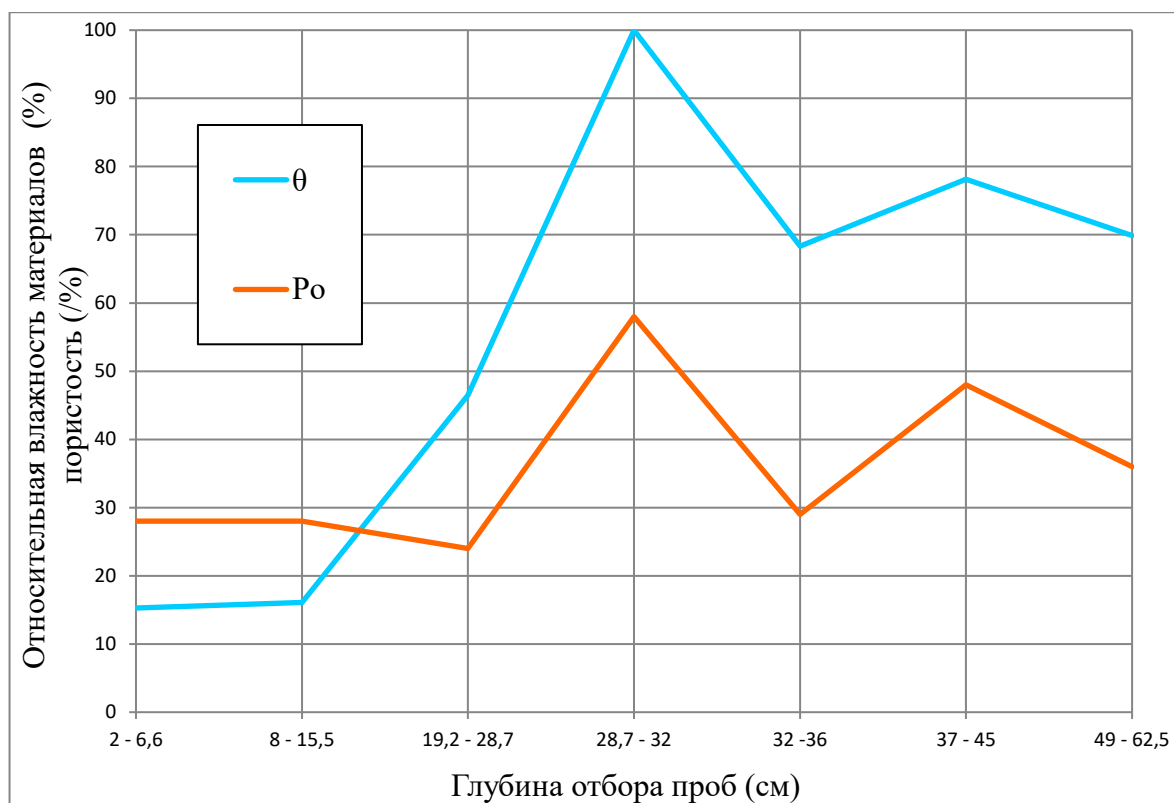


Рисунок 4.19 – Распределение относительной влажности и пористости в контрольном сечении южной части алтаря Успенского собора Княгинина монастыря во Владимире

4.4. Структурно-механические характеристики материалов

Для предварительной оценки состояния исследуемых материалов составлялась карта макротрещин, под которыми понимается отсутствие материала в кладке на достаточно продолжительном отрезке, чтобы его можно было зафиксировать прямыми методами: либо в процессе сверления («срыв» сверла), либо в процессе исследования отверстия эндоскопом. Полученная картина позволила оценить макроструктуру кладки, что в особенности важно в случае сочетания материалов с разными физическими свойствами, поскольку на их границе могут возникать неплотности и пустоты разного размера. Поскольку эти пустоты кардинальным образом влияют на распределении влаги, то их учет может позволить определить причину тех перепадов влажности, которые не удалось объяснить перепадами пористости. На Рисунке 4.21 представлено распределение влажности в контрольном сечении западной стены подклета Смоленского собора

Новодевичьего монастыря, где скачок влажности на глубине 15–20 см с 100 до 0,9% вызван существованием здесь большого провала.

Пустотность в кладке может носить изначальный характер [42], а может развиваться на пограничных участках с резким перепадом размеров пор. В последнем случае оба фактора (пустотность и размер пор) являются причиной возникновения перепадов влажности (Рисунок 4.22).

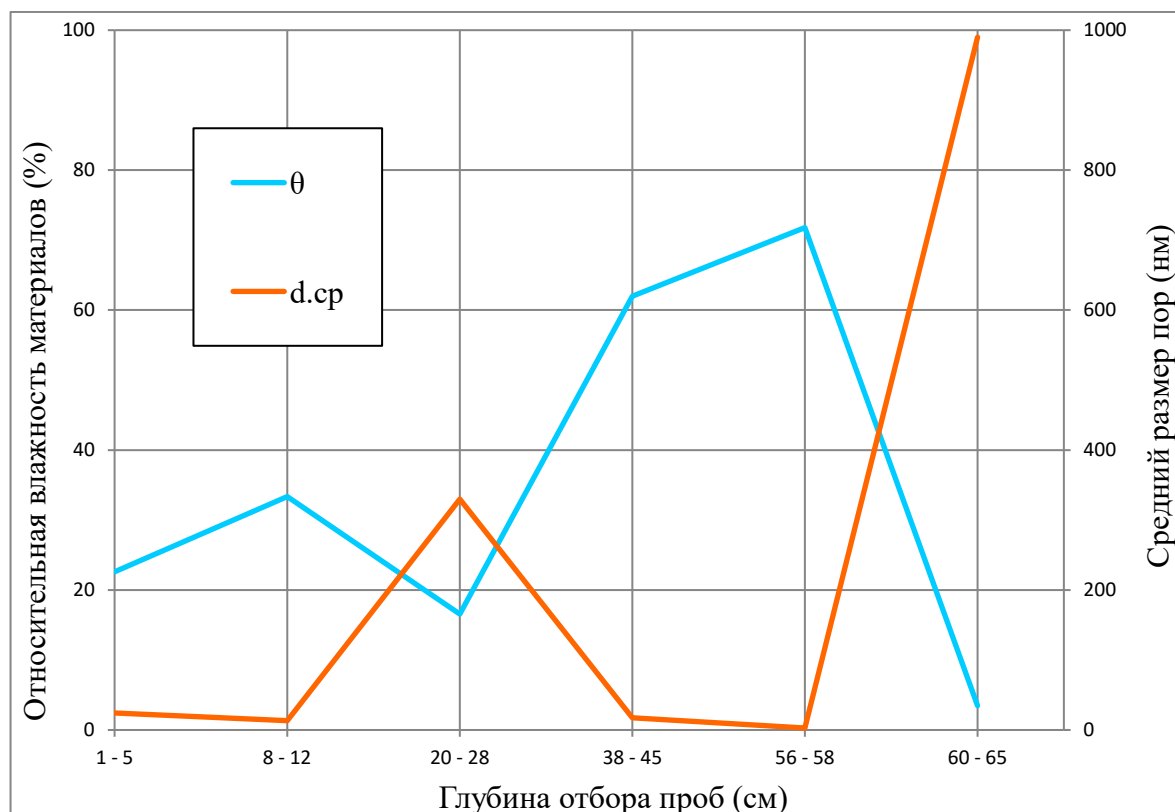


Рисунок 4.20 – Распределение относительной влажности и среднего размера пор в контрольном сечении юго-западной части Успенского собора в Смоленске

Для общего оценочного представления о степени пустотности объекта рассчитывали индекс пустотности (I_v):

$$I_v = L_v / L_t * 100, \quad (4.3)$$

где L_v – примерная совокупная протяженность зафиксированных пустот в кладке,

L_t – совокупная глубина всех контрольных сечений.

Детальное исследование структурно-механического состояния материалов анализируемого участка, базировалось на трех составляющих:

- средний вес образца в пробе;
- доля твердой части материала в пробе;
- весовые потери образца после финишного цикла увлажнения / высыхания.

Первые две характеристики связаны с размером и формой образцов проб, поскольку оба параметра могут существенно различаться. Вращение трубчатого сверла сопровождается вибрациями, вызывающими внутренние напряжения в материале. В случае материалов с небольшим количеством микротрещин и достаточными когезионными свойствами вибрационная нагрузка влияет только на длину керна, оставляя неизменной его цилиндрическую форму. В случае материалов с низкими когезионными свойствами вибрационная нагрузка приводит к нарушению / утрате цилиндрической формы и дефрагментации керна на осколки, тем более мелкие, чем более развитой является сеть внутренних микротрещин.

Отсюда, размер и, соответственно, вес образца, до определенной степени, отражают его прочностные характеристики. Чем лучше состояние материала, тем больше размер и вес образца. Прочный материал, не подверженный деструкции, позволял отбирать керны длиной до 2–4 см. На Рисунке 4.23а показана проба с глубины 15,8 см контрольного сечения юго-западной части здания 17Б Духовной Академии в СПб, где на общий диапазон пробы 8,2 см приходится всего три керна.

Наоборот, пробы материала с ослабленной структурой и развитой сетью микротрещин, были представлены набором осколков неправильной формы. На Рисунке 4.23б показана проба с глубины 12,4 см контрольного сечения центральной части алтаря Спасской церкви в Киово в Лобне, где на общий диапазон пробы 3,8 см приходится 28 «образцов» (6 штук не поместились на размерной шкале) в виде мелких осколков.

Следует отметить, что образцы в рамках одной пробы могут существенно различаться, сочетая признаки, как относительно здорового, так и относительно деструктированного материала.

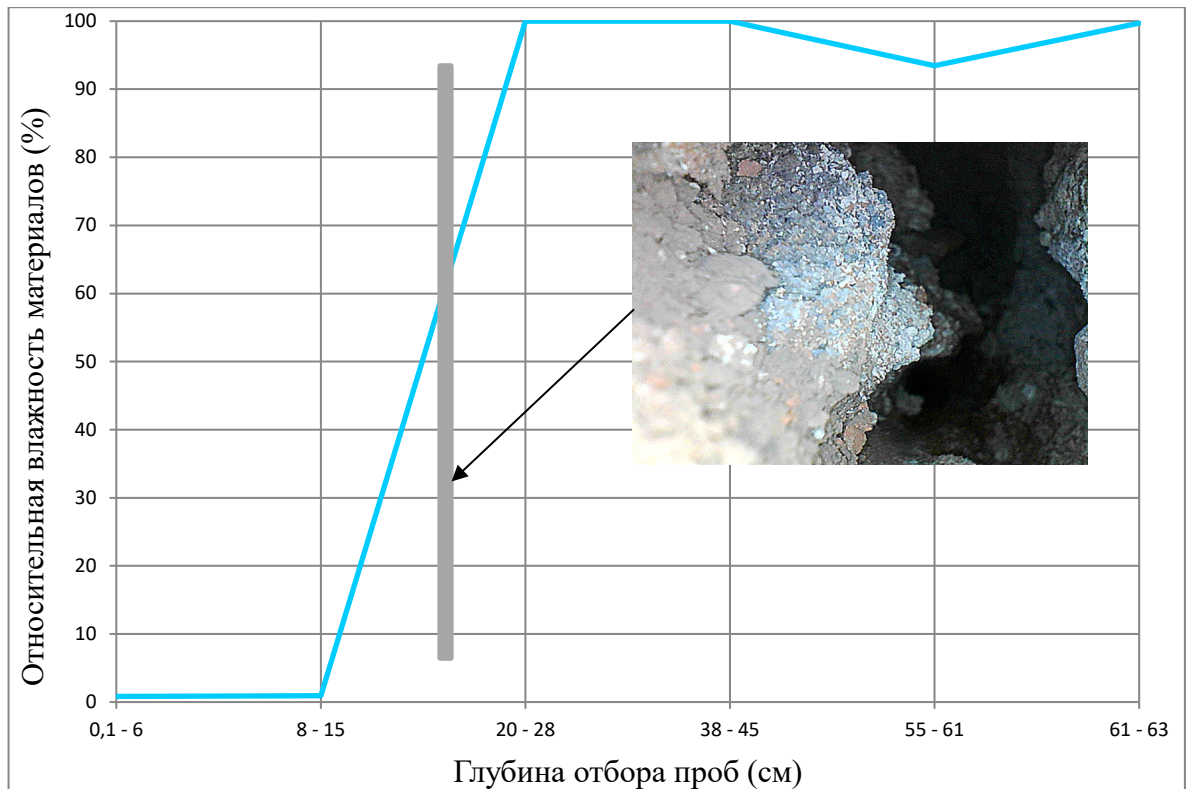


Рисунок 4.21 – Смоленский собор Новодевичьего монастыря. Перепад влажности в контрольном сечении западной стены подклета вследствие развитой пустотности

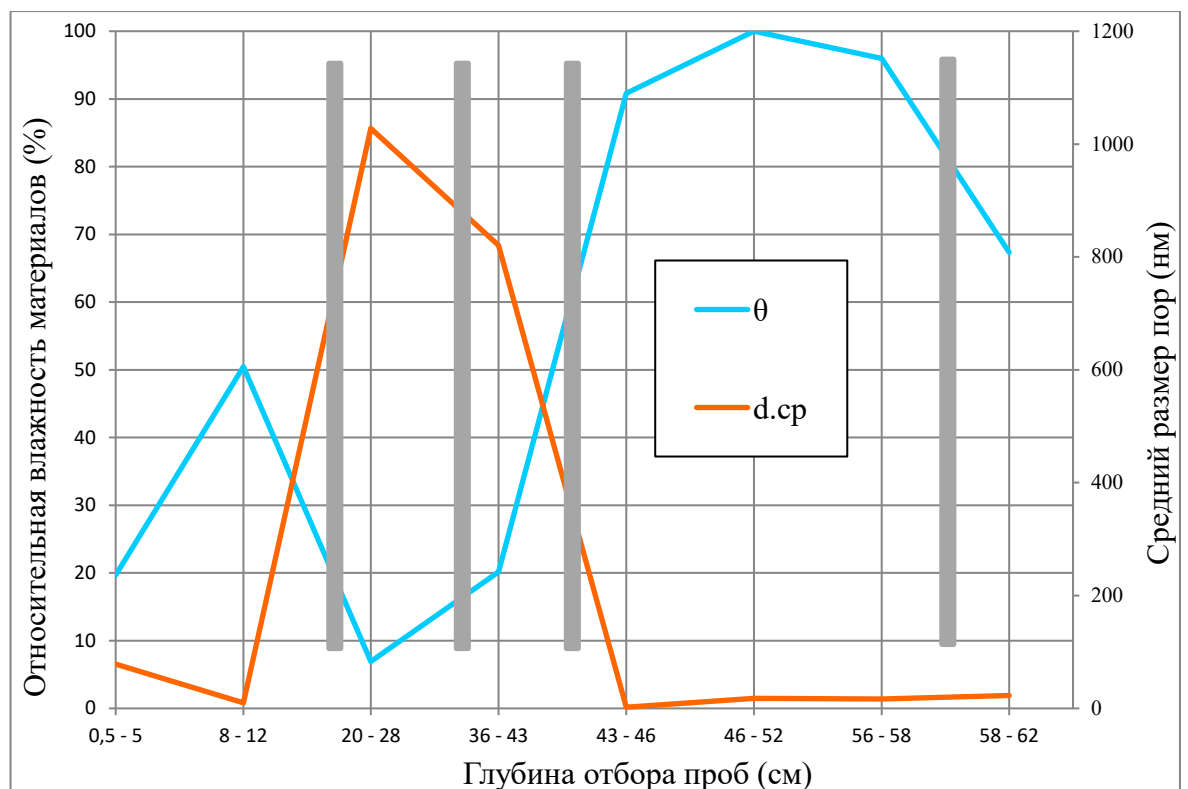


Рисунок 4.22 – Успенский собор в Смоленске. Перепады влажности в контрольном сечении северной стены подклета вследствие обоюдного влияния перепада размеров пор и развитой пустотности (черные полосы)

На Рисунке 4.24 показана проба с глубины 23,4 см контрольного сечения центральной части западной стены здания 7А Духовной Академии в СПб, где наряду с керном длиной около 2 см присутствуют 4 крупных и 8 мелких осколков. В связи с этим, с целью учета, как среднего размера образцов по всей пробе в целом, так и размера наиболее крупных образцов, значение среднего веса (G_a) рассчитывалось следующим образом:

$$G_a = (G_t + G_{ref}) / 2, \quad (4.4)$$

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.



Рисунок 4.23 – Форматы образцов проб материалов разного качества

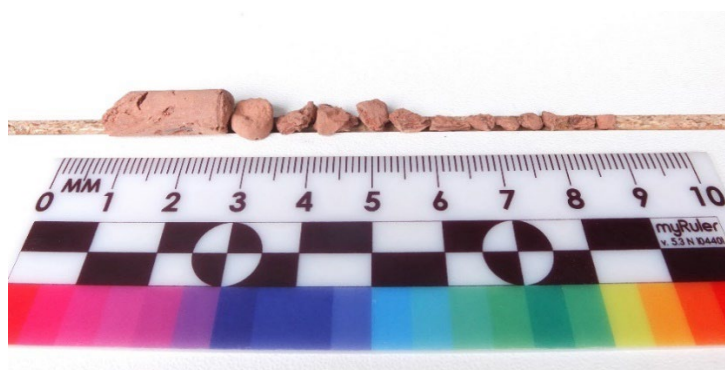


Рисунок 4.24 – Совмещение в одной пробе образцов разного формата

Результаты ранжировали по трем категориям. Первая категория – более 0,4 г – была связана с полноценными крупными кернами и отражала материалы в хорошем состоянии. Вторая категория – средний вес 0,2–0,4 г – была связана с

небольшими кернами, сохраняющими относительно правильную цилиндрическую форму, и отражала материалы с незначительным количеством микротрещин. Третья категория – менее 0,2 г – была связана, в основном, с осколками разного размера и конфигурации, и отражала материалы с явно выраженными признаками деструкции.

Уменьшение веса твердой части пробы свидетельствовало об изначальном присутствии в материале трещин / пустот, количество которых прямо пропорционально отношению реального веса к расчетному. Количественный учет полученной твердой части материала возможен исходя из следующих соображений. Используемый пробоотборник позволяет получать керн цилиндрической формы диаметром около 7 мм. Зная кажущуюся плотность материала, можно рассчитать удельный вес идеального керна длиной 1 см (W_{cm}):

$$W_{cm} = \frac{\pi d^2}{4} \rho_b, \quad (4.5)$$

где d – диаметр керна,

ρ_b – кажущаяся плотность керна.

Исходя из общей длины участка, с которого отбиралась проба можно сопоставить реальный (W_r) и расчетный (W_{cm}) удельный вес пробы и, тем самым, оценить полученную твердую часть материала (N_m):

$$W_r = W_{пр} / l, \quad (4.6)$$

$$N_m = W_r / W_{cm}, \quad (4.7)$$

где $W_{пр}$ – вес сухой пробы,

l – диапазон отбора пробы.

Результаты ранжировали по трем категориям. В первую включали материалы с долей керна более 0,75. Учитывая неизбежные технические погрешности в процессе отбора, образцы этой категории интерпретировали как целые. Ко второй категории относили материалы с долей керна 0,5–0,75, отражающие наличие условно незначительного количества пустот. К третьей категории относили материалы с долей керна менее 0,5, отражающие существенное количество пустот.

Последняя, третья, структурно-механическая характеристика относится к стадии лабораторных исследований. После завершающего цикла увлажнения / высыхания производилась оценка весовых потерь образцов (WL_3). Предполагалось, что на этом этапе образцы уже очищены от примесей, и потери в весе свидетельствовали об ослабленности структуры, поскольку в процессе кипячения в порах создается значительное напряжение [378]. Показателями весовых потерь для раствора использовали с осторожностью, поскольку, как известно, кальцит растворяется в воде [268; 269]. Полученные результаты ранжировались по трем категориям. Образцы с потерями меньше 0,5% квалифицировались как целые, более 1% – имеющие явные признаки деструкции, потери в диапазоне 0,5–1% – относили к промежуточной категории.

Анализ структурно-механических характеристик позволил определить наиболее уязвимые зоны, как в формате отдельного контрольного сечения, так и в формате объекта в целом. На Рисунке 4.25 показано распределение значений среднего веса и доли твердой части материала в контрольном сечении центральной части западной стены здания 17М Духовной Академии в СПб. Как можно видеть, бóльшая часть материалов сечения находится в хорошем состоянии, средний вес образцов проб превышает 0,4 г, доля твердой части материала превышает 0,8. Исключение составляет участок на глубине 27,5–36,6 см, где оба показателя резко снижаются, соответственно, до 0,02 г (средний вес) и 0,2 (доля твердой части). На прилагаемых к рисунку фотографиях показывается насколько сильно при этом изменяется внешний вид образцов материалов.

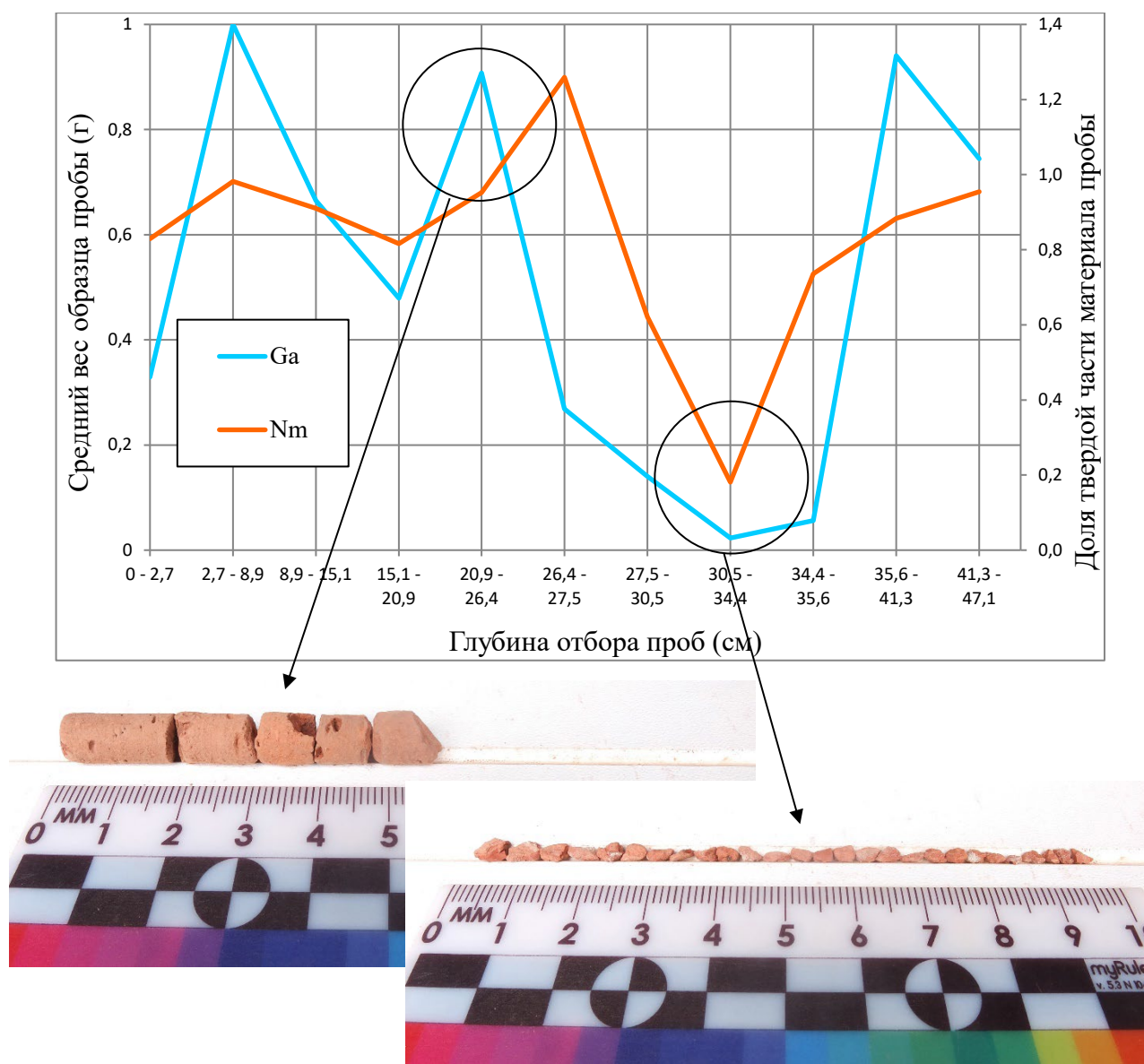


Рисунок 4.25 – Распределение значений среднего веса образцов и доли твердой части проб в контрольном сечении центральной части западной стены здания 17М Духовной Академии в

СПб

Выводы по 4 главе

В рамках теоретического и экспериментального анализов результатов исследований разработана методика оценки и интерпретации влажностного и физико-механического состояния материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН, включающая в себя следующие направления:

- Влажностные характеристики материалов. Анализ основан на нормализованных значениях влажности с дополнительным выделением капиллярной и сорбционной составляющих, что позволяло выявить природу влажности;
- Сорбционные характеристики материалов. Сопоставление данных по первичной и вторичной сорбциям позволяло выявить внутрстенные зоны испарений и зоны аккумуляции влаги;
- Физические свойства материалов. Сопоставление профилей изменения влажности с профилями изменения пористости и среднего размера пор позволяло выявить причину аккумуляции влаги;
- Структурно-механические свойства материалов. Анализ внешних параметров образцов проб позволял оценить состояние материалов и наиболее уязвимые зоны контрольных участков.

Выводы, полученные в главе 4 положены в основу исследования влияния влажности материалов каменной кладки на их физико-механические свойства.

Глава 5. Изменение физико-механических свойств материалов в зависимости от распределения влаги в каменной кладке конструкций ОКН

В данной главе рассмотрено влияние циклического увлажнения материалов на их физико-механические свойства в каменной кладке исторических конструкций ОКН.

Анализ основных тенденций, связанных с влажностью материалов, общих для всех объектов, позволил сделать вывод относительно определяющей значимости фактора развития микротрещиноватости и пустотности в распределении влажности в материалах кладки исторических конструкций.

Сопоставление полученных в результате наших исследований физических свойств материалов с физическими свойствами материалов по данным литературных источников позволило сделать предположение, что полученные физические свойства материалов каменной кладки исторических конструкций являются следствием изменения пористой системы под влиянием влаги. Рассмотрено влияние основного физического механизма разрушения на пористую систему и предложена возможная реализация процессов деструкции пор в условиях доступности конструкций для источников увлажнения.

Поскольку основной задачей представленной работы является не оценка состояния материалов конкретных объектов, а выявление общих для исследованных материалов тенденций изменения физико-механических свойств под влиянием влаги, т. е. попытка наблюдения стадий зарождения и развития процессов деструкции, то в качестве основного объекта анализа принято контрольное горизонтальное сечение – зондаж. Искомая единица позволяет делать, как макрообобщения на уровне объекта в целом, так и микроанализ на уровне отдельных проб. В анализе использовались результаты по 413 контрольным сечениям – зондажам, содержащим в совокупности 3119 проб и относящимся к 25 различным памятникам архитектуры.

Применяемые в анализе этой и следующей главы корреляционные зависимости основаны на коэффициенте Пирсона (r) со следующей условной

градуировкой: сильная корреляция – $r > 0,7$; средняя корреляция – $r = 0,5–0,7$ и слабая корреляция – $r < 0,5$.

5.1. Особенности распределения влаги в материалах каменной кладки исторических конструкций

Анализ характера распространения влажности в контрольных сечениях конструкций исследуемых объектов позволил выявить отдельные закономерности, связанные со структурными особенностями пористой системы. Миграция влаги, в целом, определяется явлениями массопереноса, что требует более глубокого изучения [8; 34; 44; 49; 61; 63].

Несмотря на то, что большая часть анализируемого в данной работе материала отбиралась на участках, доступных для постоянного или периодического увлажнения, среди всех контрольных сечений не было ни одного, материалы которого находились бы в состоянии насыщения по всей глубине отбора проб (без учета поверхностного слоя вследствие прямого влияния на него параметров воздуха). В целом можно выделить 4 варианта возможного расположения зон насыщения. В первом варианте, соответствующем возрастанию влажности по мере удаления от поверхности, насыщение достигалось в наиболее глубоких слоях (Рисунок 5.1). Во втором варианте насыщение достигалось в центральной части зондажа, тогда как поверхностные и более глубокие слои оставались в ненасыщенном состоянии (Рисунок 5.2). В третьем варианте насыщение достигалось в поверхностных слоях, тогда как более глубокие слои оставались ненасыщенными (Рисунок 5.3). Последний, четвертый, наиболее характерный для исследуемых конструкций вариант, демонстрировал насыщение материалов по всей глубине отбора проб, исключая локальные слои, сохраняющиеся, тем не менее, в ненасыщенном состоянии (Рисунок 5.4). Таким образом, даже в случае наиболее увлажненных участков (в процессе отбора на подобных участках из пробоотборника нередко наблюдалась течь воды), отдельные материалы всегда оставались увлажненными лишь частично. Подобная

ситуация может быть объяснена только при условии формирования влажностного режима отдельных слоев дискретно и независимо друг от друга, что, в свою очередь, объясняется развитой трещиноватостью и пустотностью кладки.

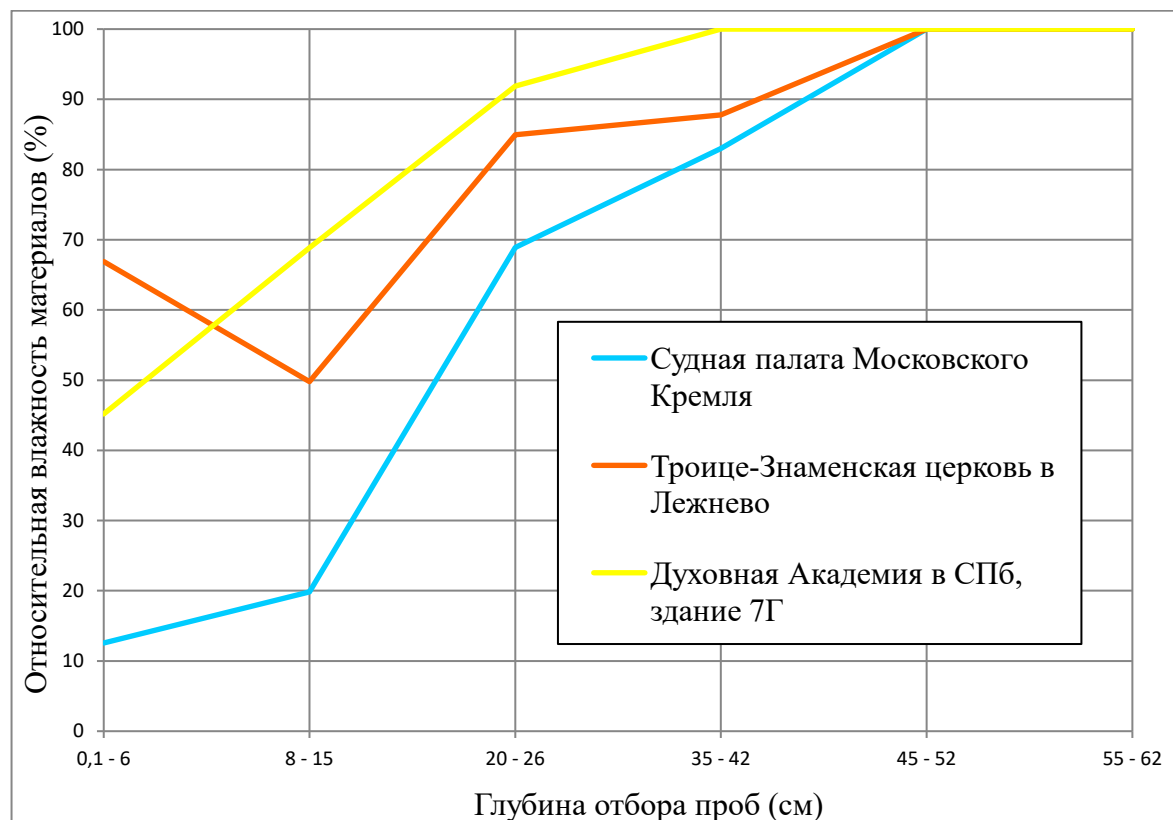


Рисунок 5.1 – Возрастание степени увлажнения материалов сечения с глубиной

Вторая тенденция связана с зависимостью плавности изменения профиля влажности контрольного сечения от степени его насыщения. Из 242 зондажей, содержащих резкие перепады влажности ($> 30\%$) между соседними участками (не считая поверхностного слоя, чтобы избежать прямого влияния окружающего воздуха), 157 сечений (65%) содержали сильно увлажненные материалы (степень увлажнения $> 70\%$), 60 сечений (25%) содержали материалы со степенью увлажнения между 40–70%, и всего 25 сечений (10%) имели практически сухие материалы, относительная влажность которых не превышала 40% (Рисунок 5.5).

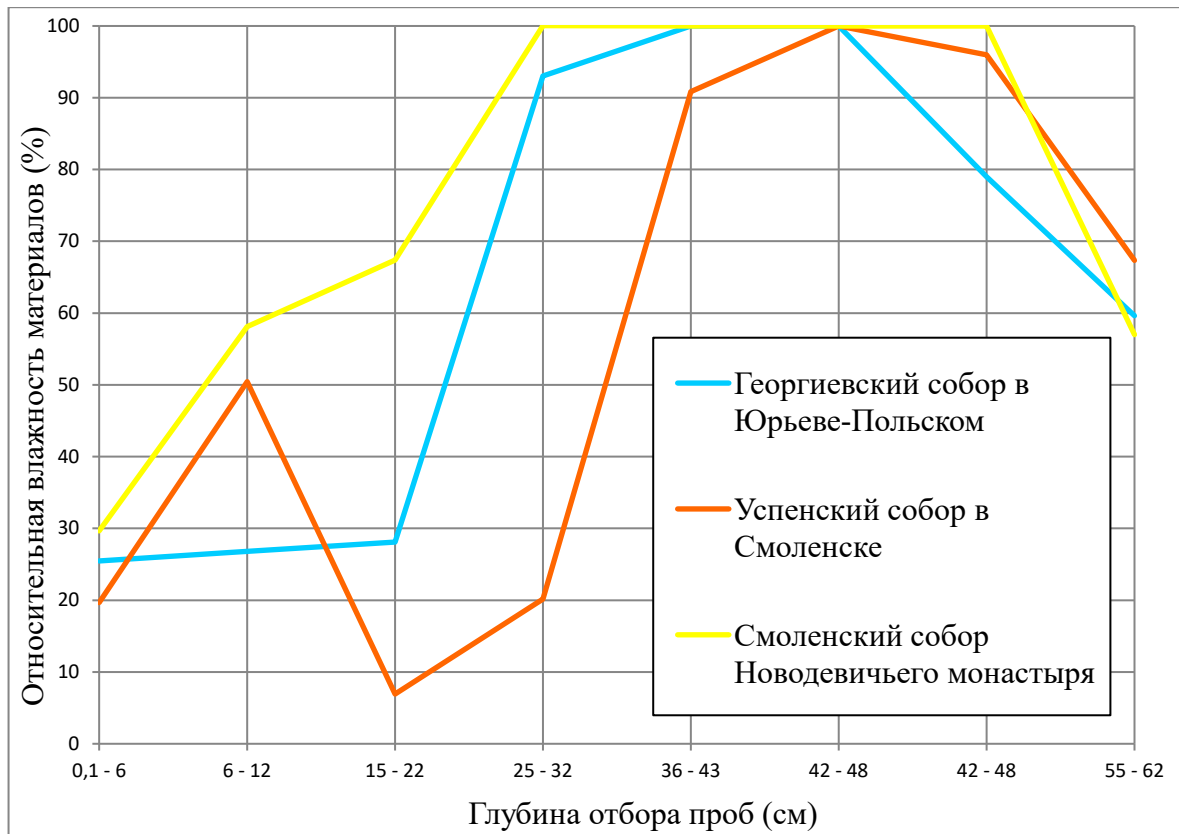


Рисунок 5.2 – Возрастание степени увлажнения материалов в центральной части сечения

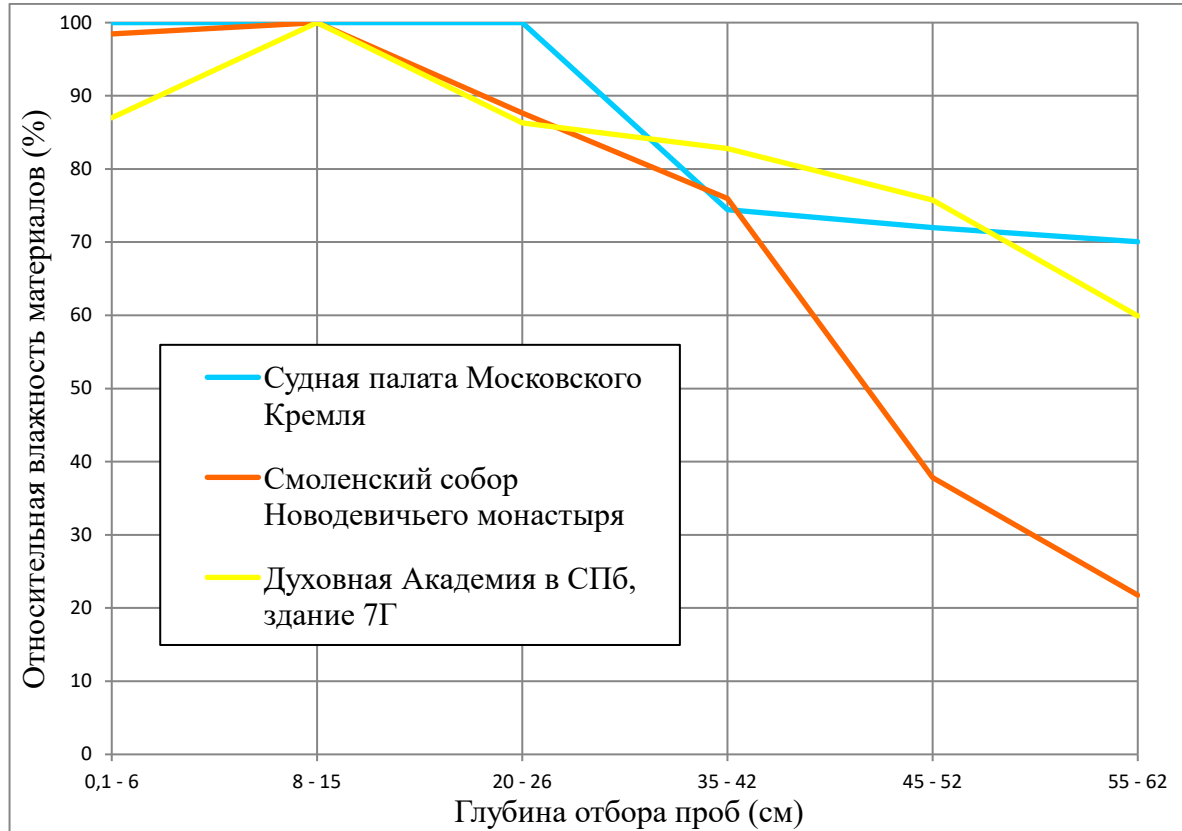


Рисунок 5.3 – Снижение степени увлажнения материалов с глубиной сечения

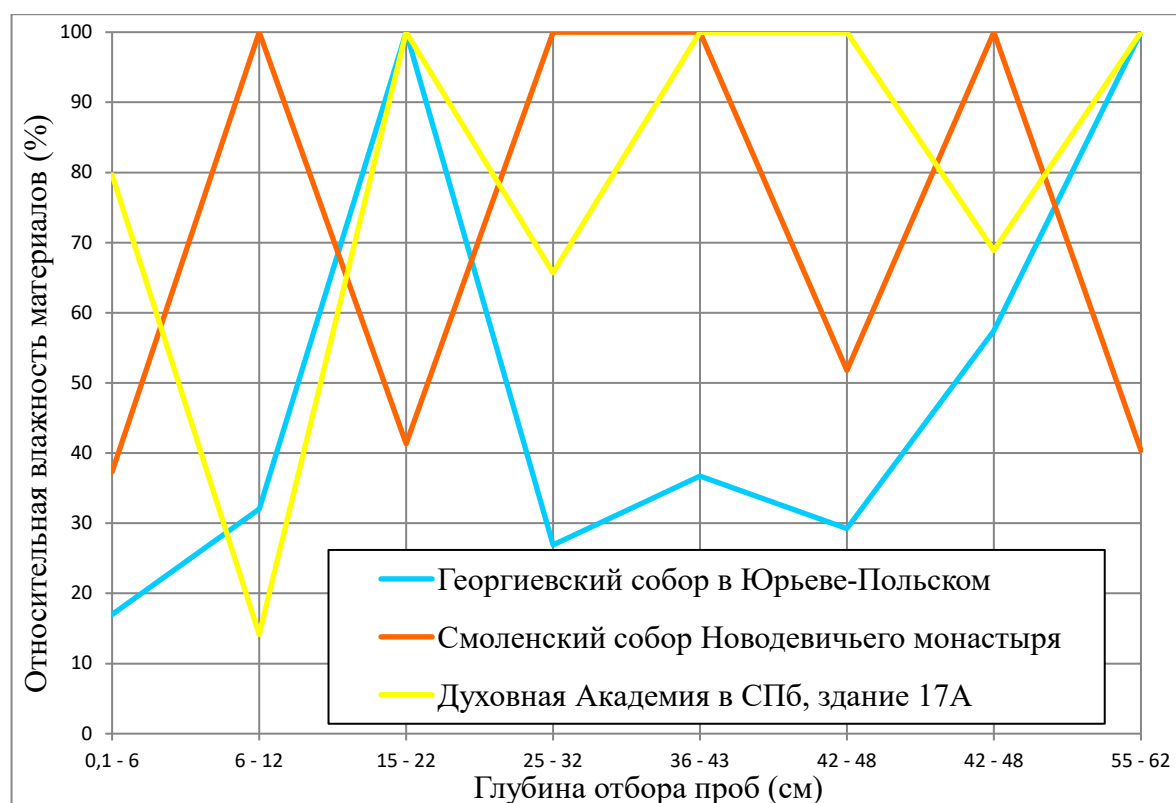


Рисунок 5.4 – Снижение степени увлажнения материалов на отдельных участках сечения

Обратная ситуация наблюдалась при обращении к контрольным сечениям с отсутствием резких перепадов. Из 63 зондажей, максимальные перепады влажности между соседними пробами которых не превышали 15%, только 10 содержали материалы, влажность которых превышала 40%. В целом, между значениями максимальной степени увлажнения материалов и максимальным перепадом между соседними пробами контрольных сечений наблюдалась средняя положительная корреляция ($r = 0,60$). Очевидно, плавное распределение, в основном, достигалось на сорбционном уровне, т. е. в сечениях, материалы которых приближались к воздушно-сухому режиму. На этой стадии отсутствие резких перепадов объясняется финишным выравниванием за счет испарения. Резкое скачкообразное изменение влажности, наоборот, было характерно для переувлажненных участков, находящихся в активной фазе первого периода высыхания, когда материалы в глубине стены находились в состоянии, приближающемся к насыщению. Отсюда следует, что начальные стадии процесса высыхания материалов исторической кладки, как правило, сопровождаются

резкими градиентами влажности по глубине. Формирование этих градиентов, по всей вероятности, вызывается затруднениями миграции жидкости, характерными для материалов с развитой микротрещиноватостью и пустотностью.

Следующее, что необходимо отметить – тенденцию к возрастанию общего диапазона влажности контрольного сечения с возрастанием степени увлажнения составляющих его материалов. В частности, в формате объектов в целом, наблюдалась, средняя отрицательная корреляция ($r = -0,59$) между (усредненными) показателями степени увлажнения объекта и количеством зондажей с диапазоном влажности, не превышающим 30%, а также слабая прямая корреляция ($r = 0,46$) между степенью увлажнения и количеством зондажей с диапазоном влажности более 60%. Связь между возрастанием степени увлажнения и возрастанием диапазона влажности контрольного сечения также может объясняться затруднением перемещения жидкости в результате развитой микротрещиноватости и пустотности материалов кладки.



Рисунок 5.5 – Соотношение степени увлажнения материалов сечения с интенсивностью перепадов влажности соседних проб

Далее, в большинстве случаев, в характере распределения влажности в горизонтальном сечении отсутствовало явно выраженное единое направление возрастания влаги из глубины к поверхности или наоборот. Более характерным являлось разнонаправленное (зигзагообразное) изменение влажности с одной или несколькими точками перелома, достигающее 68% в среднем выражении для всех объектов. В некоторых случаях скачки влажности между соседними точками могли превышать 70 – 80% (Рисунок 5.6).

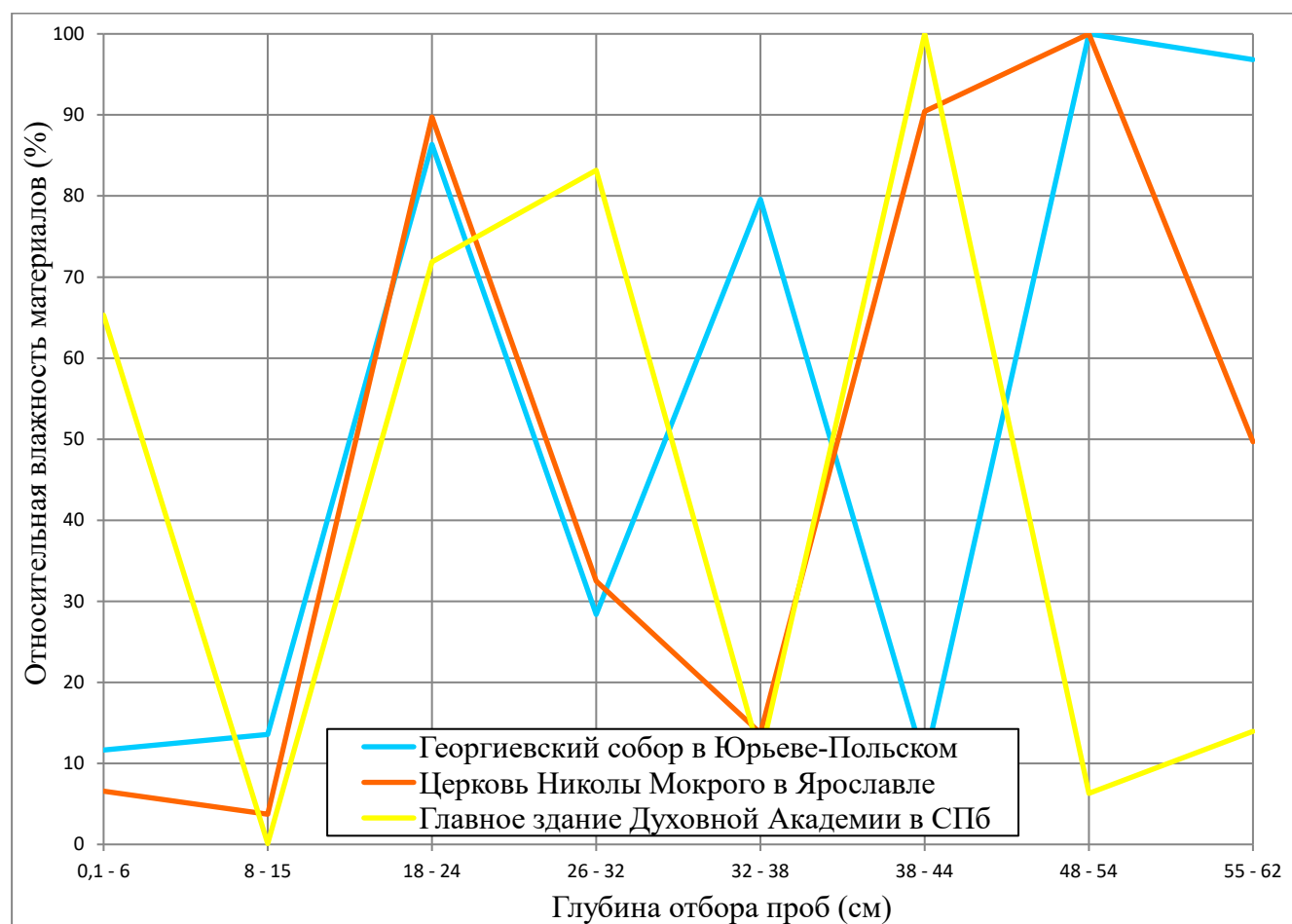


Рисунок 5.6 – Примеры зигзагообразного хода влажности в контрольных сечениях с перепадами между соседними участками более 70 – 80%

Кроме того, как было показано в главе 4, подобное разнонаправленное распределение влажности могло наблюдаться не только по горизонтали, но и по вертикали, когда отдельные контрольные участки демонстрировали локальное насыщенное состояние материалов на более высокой (метровой) отметке, при том,

что состояние материалов на более низкой отметке (в уровне пола) было ненасыщенным или насыщенным не по всей глубине сечения (Рисунок 5.7). Очевидно, что если при поступлении влаги снизу в условиях сплошной конструкции высота влажного фронта достигает метровой отметки, то это предполагает, что участки в уровне пола находятся в состоянии насыщения (исключение составляют помещения подвального типа, когда вода может поступать сбоку и сверху).

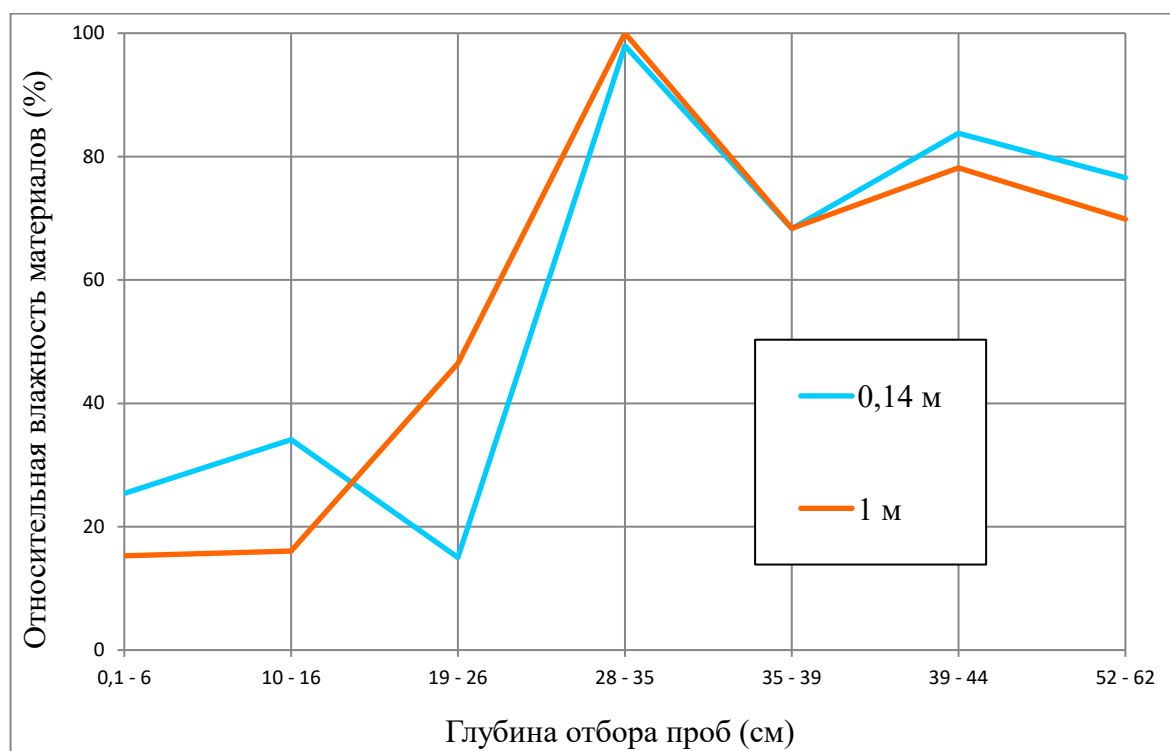


Рисунок 5.7 – Успенский собор Княгинина монастыря.

Распределение относительной влажности материалов конструкций по высоте

Наиболее вероятным объяснением данного фактора является, опять-таки, развитая внутренняя трещиноватость и пустотность кладки, препятствующая свободной миграции жидкости в процессе высыхания и, тем самым, формирующая многочисленные внутренние зоны испарения. При такой картине каждый участок кладки высыхает в собственном режиме, не зависящем от скорости высыхания остальных участков.

Таким образом, все отмеченные тенденции указывают на развитую микротрещиноватость и пустотность как на основную закономерность распределения влаги в материалах кладочных систем.

5.2. Корреляция пустотности с участками рассогласованности направлений изменения влажности и размера пор

Полученные результаты свидетельствуют, что ожидаемый «противоход» профилей влажности и среднего размера пор в исследуемых контрольных сечениях наблюдается не всегда. Нередко возрастание влажности участков сопровождается возрастанием значений среднего размера пор, и наоборот.

Для количественной оценки указанного отклонения от физических закономерностей был проведен подсчет таких участков, с использованием всех имеющихся 2645 перепадов между соседними участками внутри контрольного сечения кладки. Поскольку основной интерес вызывала корреляция в рамках достаточно явно выраженных колебаний, то были выбраны только перепады, составляющие более 15% по относительной влажности материалов. Всего было зафиксировано 1094 таких перепадов, из которых, в 387 случаях, т. е. в 35%, направление изменения влажности не было связано обратной зависимостью с направлением изменения размера пор, как предполагает физическая теория. Еще в 116 случаев имело место противоположное по направленности изменение среднего размера пор, но с интенсивностью менее, чем в два раза. Учет этих случаев также оправдан, поскольку столь незначительное изменение пористости не может вызвать резкий скачок влажности. Таким образом практически в половине случаев (46%) физические закономерности не соблюдались или соблюдались не в полной мере [66].

Указанные проявления могут возникнуть только в случае нарушения гидравлической связи внутри кладки, при котором влажностный режим соседних участков формируется независимо, причем не только на стадии высыхания, но и на стадии увлажнения. Нарушение гидравлической связи, в свою очередь, может

возникнуть по причине развития внутри кладки разного вида дефектов, начиная от мельчайших микротрещин и до макротрещин различных визуально. Ниже приводятся методы, позволяющие прямо или косвенно оценить степень пустотности в исследуемых конструкциях [66].

Наиболее простой и явный метод выявления пустотности в кладке связан с эндоскопическим исследованием отверстия зондажа. Однако этот метод имеет значительные ограничения, основным из которых, естественно, является возможность фиксации только трещин, размеры которых исчисляются в миллиметрах или даже в сантиметрах. Меньшие размеры, как правило, просто затираются шламом в процессе отбора проб и становятся неразличимыми для последующего визуального обследования.

Второй метод связан с равномерностью прохода пробоотборника в процессе отбора материала. Резкое снижение сопротивления сверлению или локальный «срыв» сверла позволяют не только достаточно точно зафиксировать сам факт присутствия внутренней полости, но и провести ее относительно точное позиционирование по глубине. Несмотря на то, что в сравнении с визуальным, данный метод позволяет фиксировать более мелкие трещины он, тем не менее, остается достаточно грубым, позволяя фиксировать только «хорошо развитые» трещины. Кроме того, степень «точности» данного метода во многом зависит от прочности предшествующего трещине материала. Чем он прочнее, тем четче ощущается «срыв» сверла. И наоборот, чем материал мягче, тем менее четко воспринимается срыв и, соответственно, увеличивается размер пустотности, которую можно отследить подобным образом.

Уменьшение количества твердой части материала пробы, в сравнении с расчетным количеством, указывает на то, что часть материала, либо уже отсутствовала на момент отбора проб, либо была разрушена до порошкообразного состояния в процессе сверления. Если материал был утрачен до начала отбора проб, то в данной пробе имела место, в той или иной степени, развитая пустотность. Если же материал был утрачен в процессе отбора проб в результате вибраций от вращения корончатого сверла, то это может

свидетельствовать о существовании, в той или иной степени развитой, сети микротрещин. Как первое, так и второе, можно охарактеризовать в формате пустотности разной стадии развития. Для практического применения было условно принято, что для констатации подобной формы деструкции (наличия пустотности) достаточно потери более четверти отбираемого материала, на что будет указывать доля твердой части материала в пробе (N_m) менее 0,75.

По тем же соображениям, на развитую микротрещиноватость указывает и снижение среднего веса образца в пробе. Траектории разломов образцов под действием вибраций пробоотборника, естественно, проходят по наиболее слабым участкам, т. е. участкам с внутренними трещинами. Колебание длины кернов в пробах, само по себе, не может служить показателем какой-либо тенденции. Однако таким показателем может служить условный порог трансформации цилиндрического керна в бесформенный осколок, который удобно фиксировать в весовом формате. Для практического применения было условно принято, что на развитую трещиноватость указывает средний вес образца пробы (G_a) менее 0,2 г.

Косвенным свидетельством развитой микротрещиноватости и пустотности являются внутренние зоны испарения. Обоснованием для данного метода является тот факт, что воздушные прослойки и полости блокируют жидкость, после чего ее перемещение возможно только в виде пара. В результате, на участках с развитой пустотностью или границе материалов со значительным перепадом размера пор, влага будет постепенно испаряться, создавая условия для концентрации в пограничной зоне примесей, содержащихся в воде. В качестве таких примесей могут выступать водорастворимые соли, микрообломки и частицы почвы. Признаком существования зоны испарения, как было показано в главе 4, может служить снижение показателей степени микропористости и удельной площади поверхности после очищения образцов от примесей. Для практического применения было условно принято, что снижение $P_{0,1}$ на 8%, а $S_{уд}$ на 5 м²/г после промывки образцов от примесей (по результатам вторичной сорбции) свидетельствует о наличии зоны испарения.

Основной проблемой интерпретации результатов и, соответственно, данного метода, является тот факт, что в процессе циклов увлажнения / высыхания может происходить не только очистка материалов от примесей, но и (при ослабленной структуре материала) дальнейшее развитие деструкции, в частности развитие и распространение сети микротрещин. В этом случае будут параллельно развиваться два независимых, противоположных по направлению, процесса, один из которых будет связан с очищением пор от солей и микрообломков, т. е. направлен на уменьшение гигроскопичности материала; тогда как другой будет вызывать дальнейшее увеличение количества микротрещин и, тем самым, будет стремиться изменить микроструктуру материала в сторону возрастания гигроскопичности. В случае преобладания последнего может наблюдаться, не только не снижение, но даже возрастание сорбционных характеристик по результатам вторичной сорбции. Снижение показателей по результатам вторичной сорбции будет однозначно указывать на существование зоны испарения. Возрастание же показателей подразумевает возможность двоякого толкования, поскольку нет возможности оценить, имели ли место оба процесса – снижение сорбционных характеристик в результате очищения пор от примесей и возрастание сорбционных характеристик в результате дальнейшего развития сети микротрещин – или только последний из них, фиксируемый инструментально [66].

Для численной корреляции участков с признаками пустотности с участками рассогласованности направлений изменения влажности и размера пор выбирались только те участки, где перепады по обоим показателям, как по влажности, так и по размеру пор, были выражены достаточно явно. Порог перепада по влажности между соседними пробами был выбран более 15%, по среднему размеру пор – более чем в два раза. По совпадению обоих критериев было выявлено 118 участков, где снижение влажности с глубиной сопровождалось уменьшением среднего размера пор и 163 участка, где возрастание влажности сопровождалось, соответственно, увеличением среднего размера пор. Таким образом, всего набралось 281 участок, где динамика показателей влажности и среднего размера пор не соответствовала предполагаемой. Из этих 281 участков только на 18 (менее

6%), не прослеживалось каких-либо признаков, указывающих на существование внутренней пустотности. Следует отметить, что на большинстве этих незатронутых участков наблюдалось возрастание сорбционных показателей по результатам вторичной пористости. Это может указывать на то, что развитие деструкции в процессе циклов увлажнения / высыхания вследствие ослабленности микроструктуры могло скрыть факт снижения сорбционных характеристик в результате очищения от примесей и, таким образом, не дать возможности зафиксировать наличие на данных участках признаков пустотности.

Полученные результаты позволяют предположить, что даже на тех участках, где прослеживалась видимая зависимость между влажностью и средним размером пор, данная зависимость могла быть не более чем совпадением, тогда как на самом деле влажностные режимы данных участков формировались независимо. Оценка по совокупности всех 2645 перепадов показала, что только 245 из них (менее 9%), не имели каких-либо явных признаков микротрещиноватости.

Из сказанного можно сделать вывод, что характер распределения влажности исследованных нами материалов, в первую очередь, определяется не свойствами самих материалов, а развитой в них пустотностью [66].

5.3. Общая характеристика физических свойств пористого пространства исследованных материалов

Пористость исследуемых образцов кирпича была представлена в достаточно узком диапазоне 24–35%. При этом большая часть (15 объектов, 65%) находилась в диапазоне 29–32%. Пористость раствора демонстрировала несколько больший диапазон (22 до 44%). Однако обе крайние точки были представлены только одним случаем, если не учитывать которые, то более половины всех значений (52%), как и в случае с кирпичом, находились в диапазоне 29–33%. Распределение пористости по объектам представлено на Рисунке 5.8, усредненная – в Таблице 5.1.

Значения среднего размера пор демонстрировали достаточно явную тенденцию к снижению в область микропор. Для кирпича, более чем для половины

объектов (52%) количество участков со средним размером пор меньше 0,1 мкм составило 30–50%. Еще для 9 объектов (39%) количество микропористых участков превысило 50%. Для раствора указанная тенденция проявлялась еще более четко. На всех объектах количество микропористых участков превысило 80% (Рисунок 5.9, Таблица 5.2).

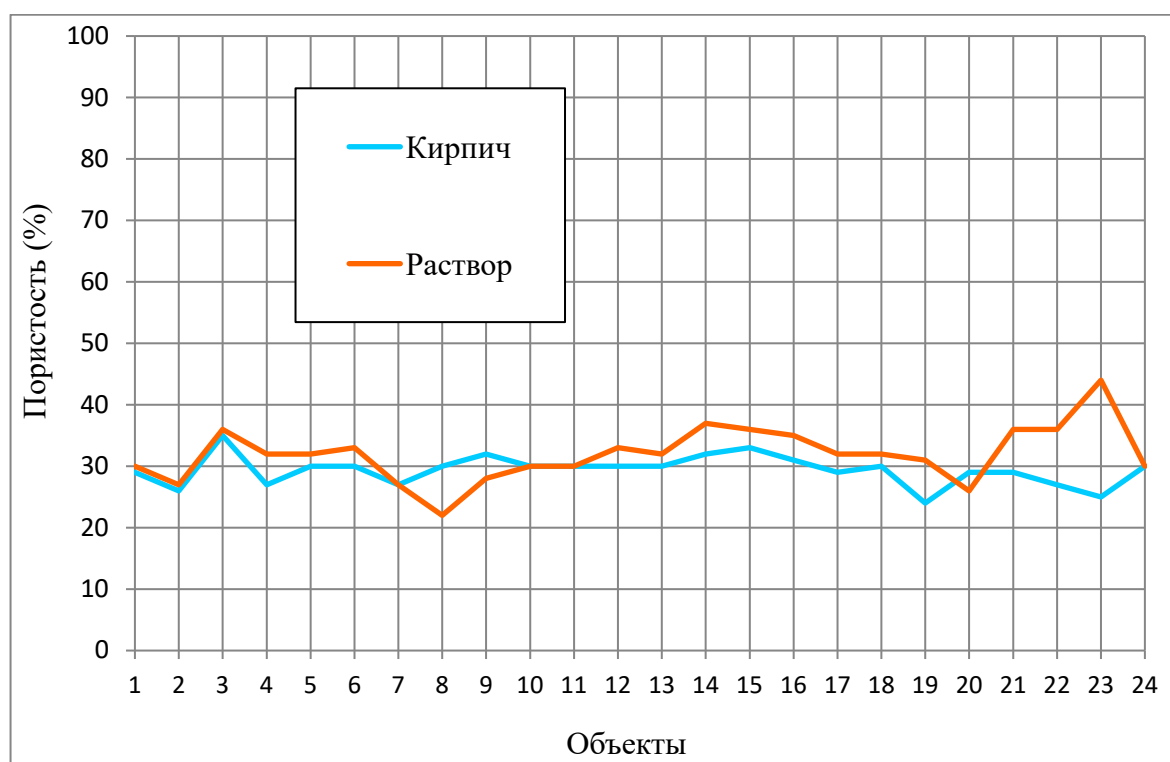


Рисунок 5.8 – Распределение пористости материалов по объектам. Церковь Богоявления Рязанского Кремля (1), Георгиевский собор в Касимове (2), Успенский собор Княгинина монастыря (3), Троице-Знаменская церковь в Лежнево (4), Спасская церковь в Киово в Лобне (5), Усадьба Лопухиных в Москве (6), Мечеть на Большой Татарской в Москве, главное (7) и административное (8) здания, церковь Николая Мокрого в Ярославле (9), Духовная академия в СПб здания: 7А (10), 7Б (11), 7Г (12), 9 (13), 11 (14), 15 (15), 17А (16), 17Б (17), 17Г (18), 17М (19), 17Х (20), Успенский собор в Смоленске (21), Смоленский собор Новодевичьего монастыря в Москве (22), Судная палата Архангельского собора Московского Кремля (23), Троицкий собор в Яхrome (24)

Таблица 5.1 – Соотношение значений (%) пористости (P_o) материалов. $P_{o-ср}$ - средние значения; < 30% ... > 40% - процент P_o соответствующего диапазона

	Кирпич	Раствор
$P_{o-ср}$	29,4	32
<30	42	21
30 - 40	58	75
>40	0	4

Таблица 5.2 – Соотношение значений (%) среднего размера пор ($d_{ср}$) (мкм) материалов. $d_{ср-ср}$ - средние значения; < 0,1 ... > 1 - процент $d_{ср}$ соответствующего диапазона

	Кирпич	Раствор
$d_{ср-ср}$	0,3	0,02
<0,1	13	100
0,1-0,5	71	0
0,5-1	17	0
>1	0	0

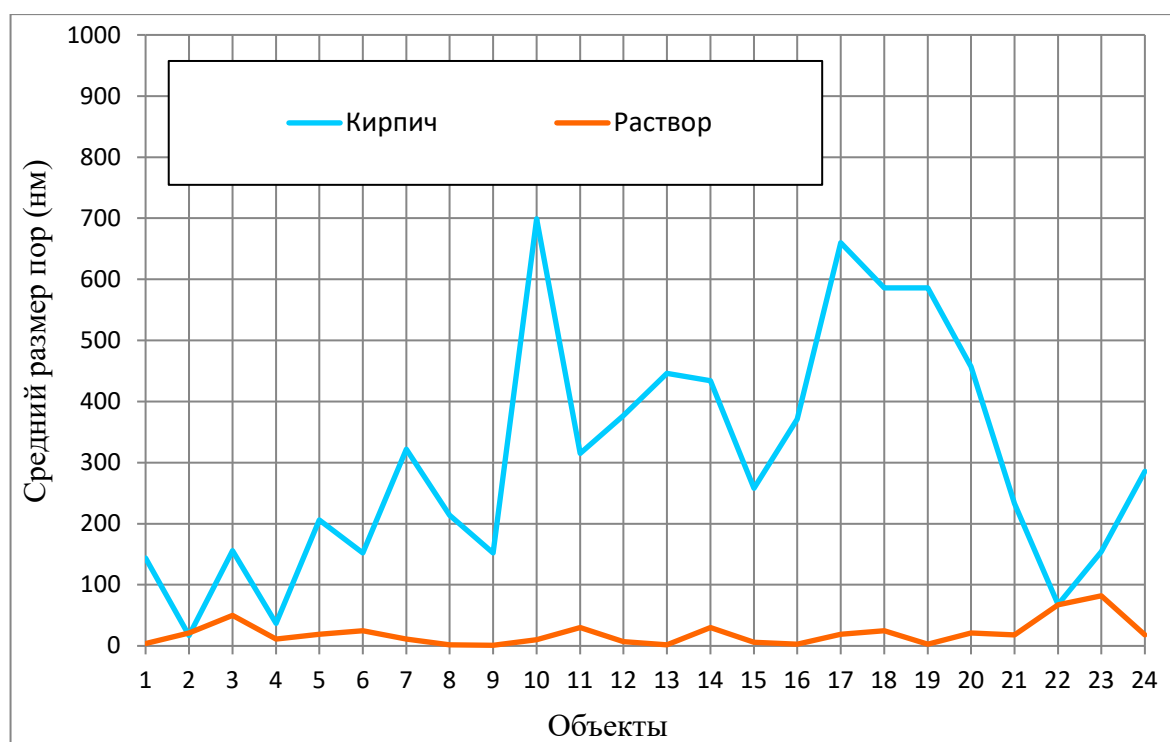


Рисунок 5.9 – Распределение среднего размера пор материалов по объектам. Церковь Богоявления Рязанского Кремля (1), Георгиевский собор в Касимове (2), Успенский собор Княгинина монастыря (3), Троице-Знаменская церковь в Лежнево (4), Спасская церковь в Киово в Лобне (5), Усадьба Лопухиных в Москве (6), Мечеть на Большой Татарской в Москве, главное (7) и административное (8) здания, церковь Николы Мокрого в Ярославле (9), Духовная академия в СПб здания: 7А (10), 7Б (11), 7Г (12), 9 (13), 11 (14), 15 (15), 17А (16), 17Б (17), 17Г (18), 17М (19), 17Х (20), Успенский собор в Смоленске (21), Смоленский собор Новодевичьего монастыря в Москве (22), Судная палата Архангельского собора Московского Кремля (23), Троицкий собор в Яхrome (24)

Оценка по степени микропористости кирпича, т. е. отношения значения максимальной сорбции к водопоглощению при повышенном давлении, показала,

что на большей части объектов (61%) показатели кажущейся степени микропористости (на неочищенных образцах) составляли более 10%. После промывки образцов (по данным вторичной сорбции) значения степени микропористости несколько снизились, степень микропористости выше 10% были зафиксированы для 10 объектов (43%).

Для раствора тенденция к увеличению сорбционных характеристик просматривалась еще более четко. Средние значения микропористости, как по данным первичной, так и по данным вторичной, сорбций для всех объектов превышали 10% (Рисунок 5.10, Таблица 5.3).

Усредненные значения удельной площади поверхности кирпича, по данным первичной сорбции, достаточно равномерно распределились в широком диапазоне 2,4–17 м²/г. Для 35% объектов удельная поверхность не превышала 5 м²/г, для 35% – находилась в диапазоне 5–10 м²/г, и соответственно, для оставшихся 30% удельная поверхность превышала 10 м²/г. По данным вторичной сорбции средние показатели ожидаемо несколько снизились, количество объектов с удельной поверхностью более 10 м²/г сократилось до 22%. Для раствора значения удельной поверхности были существенно выше. По данным первичной сорбции средние значения удельной поверхности превышали 10 м²/г для 87% объектов, по данным вторичной сорбции – для 70% объектов (Рисунок 5.11, Таблица 5.4).

Полученные данные продемонстрировали общую для всех исследованных материалов тенденцию к снижению среднего размера пор, а также возрастанию сорбционных характеристик и удельной поверхности. Можно предположить, что данная тенденция указывает на зарождение и развитие сетей микротрещин. Поскольку более явные изменения наблюдались в образцах раствора, то это может свидетельствовать о том, что раствор более подвержен процессам деструкции.

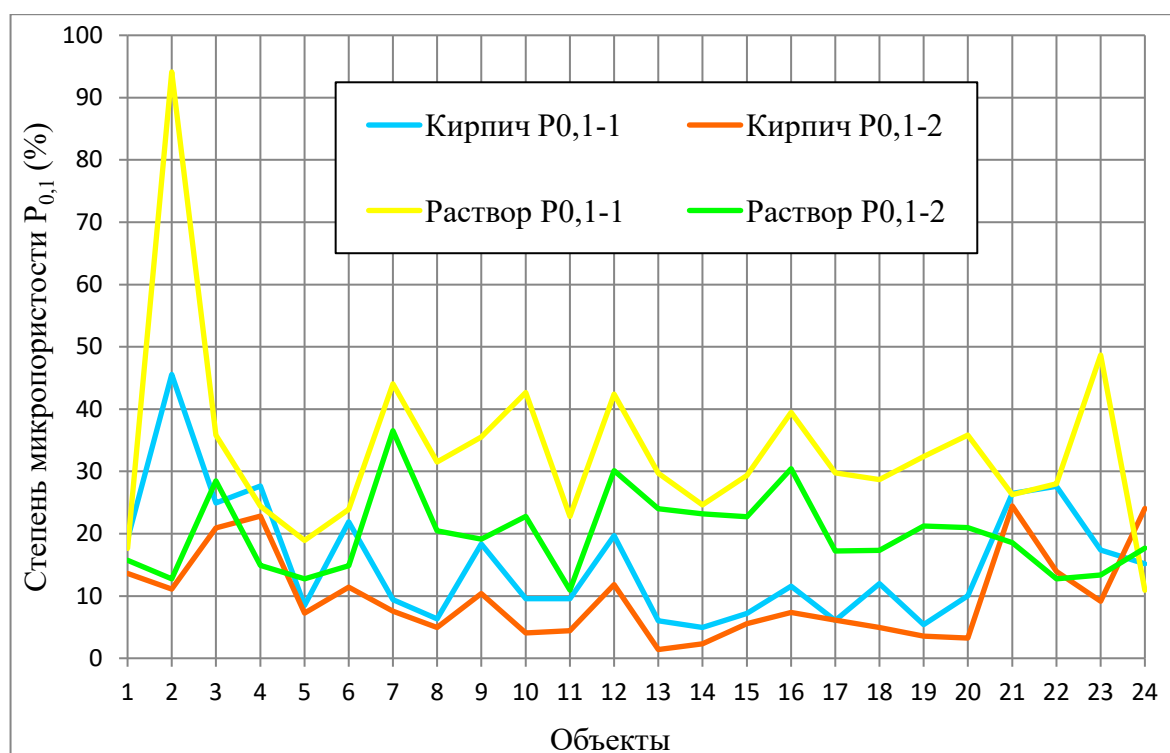


Рисунок 5.10 – Распределение степени микропористости ($P_{0,1-1}$ первичная, $P_{0,1-2}$ вторичная) материалов по объектам. Церковь Богоявления Рязанского Кремля (1), Георгиевский собор в Касимове (2), Успенский собор Княгинина монастыря (3), Троице-Знаменская церковь в Лежнево (4), Спасская церковь в Киово в Лобне (5), Усадьба Лопухиных в Москве (6), Мечеть на Большой Татарской в Москве, главное (7) и административное (8) здания, церковь Николы Мокрого в Ярославле (9), Духовная академия в СПб здания: 7А (10), 7Б (11), 7Г (12), 9 (13), 11 (14), 15 (15), 17А (16), 17Б (17), 17Г (18), 17М (19), 17Х (20), Успенский собор в Смоленске (21), Смоленский собор Новодевичьего монастыря в Москве (22), Судная палата Архангельского собора Московского Кремля (23), Троицкий собор в Яхrome (24)

Таблица 5.3 – Соотношение значений (%) степени микропористости ($P_{0,1}$, %) материалов. $P_{0,1-ср}$ - средние значения; < 5% ... > 10% - процент $P_{0,1}$ соответствующего диапазона

	Кирпич	Раствор
$P_{0,1-ср}$	48	96
<5	0	0
5 - 10	0	0
>10	100	100

Таблица 5.4 – Соотношение значений (%) удельной площади поверхности (m^2/g) материалов. $S_{уд-ср}$ - средние значения; $S_{уд-i}$ - удельная площадь поверхности образцов с примесями (1) и без примесей (2); < 5 ... > 10 - процент $S_{уд}$ (m^2/g) соответствующего диапазона

	Кирпич		Раствор	
	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$
$S_{уд-ср}$	7,4	6,2	24,8	16,2
<5	38	50	0	8
5 - 10	33	29	13	21
>10	29	21	88	71

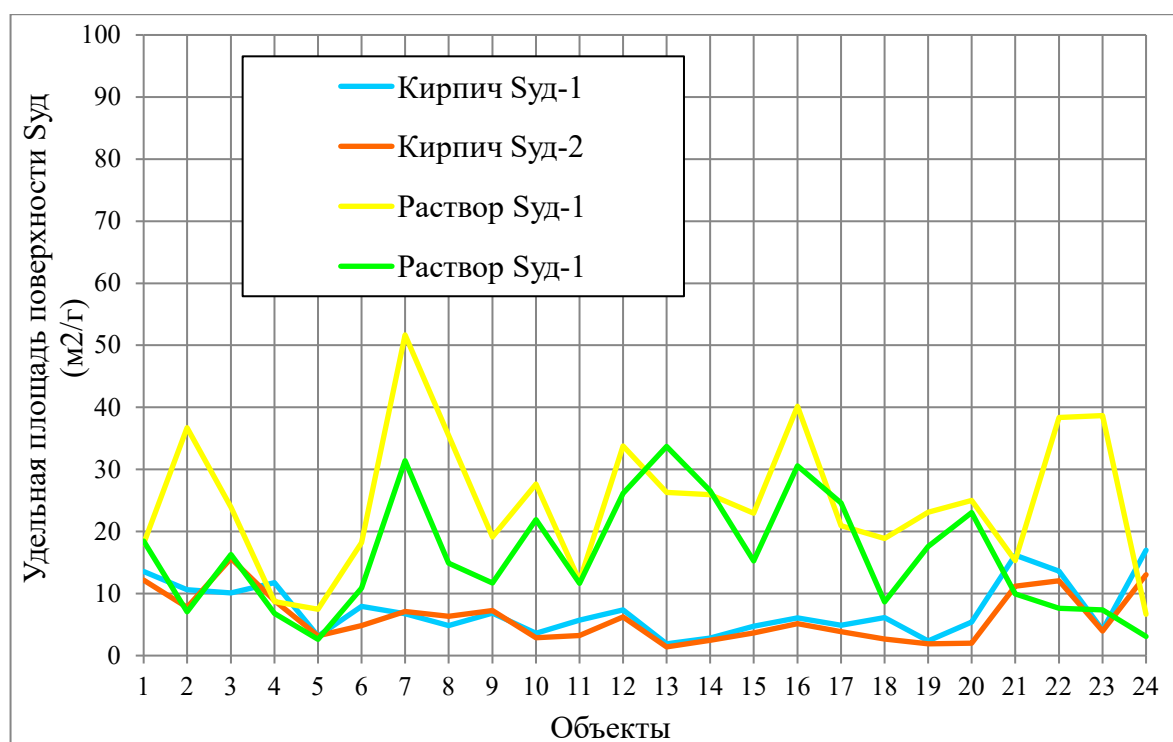


Рисунок 5.11 – Распределение удельной площади поверхности ($S_{уд-1}$ первичная, $S_{уд-2}$ вторичная) материалов по объектам. Церковь Богоявления Рязанского Кремля (1), Георгиевский собор в Касимове (2), Успенский собор Княгинина монастыря (3), Троице-Знаменская церковь в Лежнево (4), Спасская церковь в Киово в Лобне (5), Усадьба Лопухиных в Москве (6), Мечеть на Большой Татарской в Москве, главное (7) и административное (8) здания, церковь Николы Мокрого в Ярославле (9), Духовная академия в СПб здания: 7А (10), 7Б (11), 7Г (12), 9 (13), 11 (14), 15 (15), 17А (16), 17Б (17), 17Г (18), 17М (19), 17Х (20), Успенский собор в Смоленске (21), Смоленский собор Новодевичьего монастыря в Москве (22), Судная палата Архангельского собора Московского Кремля (23), Троицкий собор в Яхrome (24)

5.4. Сопоставление физических свойств исследуемых материалов со свойствами материалов по литературным источникам

Какие-либо конкретные сведения о физических свойствах материалов исторических конструкций на момент их изготовления достаточно немногочисленны, что не позволяет сделать прямые выводы относительно того, являются ли полученные в процессе исследований параметры изначальными, или они вызваны трансформацией пористой структуры под влиянием влаги.

Обращение к имеющимся дореволюционным литературным источникам по производству кирпича показывает, что требования к его качеству, были не меньше, а в некоторых аспектах даже превышали требования к качеству современного строительного кирпича. Ржанов пишет, что хорошо обожженный, «звонящий» кирпич должен быть «крѣпокъ, – при ударѣ не рассыпался бы на части, – плотенъ, мелкослоенъ и при изломѣ стекловиденъ, что означает хорошую промѣсь глины и удачный обжигъ; звонъ кирпича долженъ быть какъ крѣпкаго, хорошаго горшка» [48]. С точки зрения долговечности он «долженъ протявостоять обыкновеннымъ атмосфернымъ влияниямъ, такъ например сырость и морозъ не должны вести за собою лупление, растрескивание или разрыхление кирпичей» [47]. Де-Рошефор указывает, что «воды хороший кирпич должен впитывать не более 5%, от 15% он разрушается на морозе». И далее «... для монументальных и высоких сооружений кирпич признавать годным только тот, который будучи положен плашмя, не раздробляется от давления 86,5 пудов на квадратный вершок или 28 пуд на квадратный дюйм» [25], что приблизительно составляет 7 Мпа. Во всех изданиях урочного положения существует требование «на каждом кирпичном заводе иметь одного мастера, кирпичное дело в совершенстве знающего, для наблюдения за выделкою и особенно за обжиганием кирпича» [60]. Кирпич низкого качества (в основном, недожог) оценивался как брак и попадал на стройплощадки, как правило, в результате обмана [48]. Вероятность такого обмана во многом зависела от формата строящегося здания и резко снижалась при возведении серьезных знаковых объектов. Поскольку все наши исследования относятся именно к таким объектам, то можно предположить, что количество изначально бракованного кирпича на них сводилось к условному минимуму.

Технология изготовления кирпича пластического формования изменилась, прежде всего, в плане перехода от ручного режима к автоматизированному. В остальных аспектах, в частности, по подготовке глины и режимах обжига, технология не претерпела принципиальных изменений [6; 25; 33; 47; 48; 55]. Вопрос несовершенства печей в отношении недостаточно равномерного распределения тепла в крайних зонах следует отнести не столько к технологии как

таковой, сколько к увеличению количества брака и последующей сортировке материала. Технология изготовления известкового раствора не претерпела каких-либо изменений. Сказанное позволяет допустить возможность использования для оценки и ранжирования полученных в результате наших исследований параметров физических свойств материалов, данные по материалам, полученные на основании литературных источников.

Обобщив имеющиеся опубликованные данные по свойствам кирпичей мы сгруппировали их в таблицы по трем категориям: кирпич ручного изготовления (ручной) [82; 90; 116; 134; 135; 152; 157; 234; 249; 274; 303; 305; 313; 365], кирпич фабричного изготовления (фабричный) [78; 82; 116; 129; 130; 148; 149; 150; 151; 210; 224; 228; 234; 243; 273; 274; 287; 291; 303; 313; 342; 348; 365; 376] и кирпич, отобранный из памятников архитектуры (из конструкций) [77; 82; 83; 95; 124; 139; 148; 153; 157; 158; 234; 246; 247; 249; 278; 284; 287; 305; 346; 349; 365]. Сравнительные характеристики кирпичей по пористости, среднему размеру пор и удельной площади поверхности приведены на Рисунках 5.12–5.14 и в Таблицах 5.5–5.7.

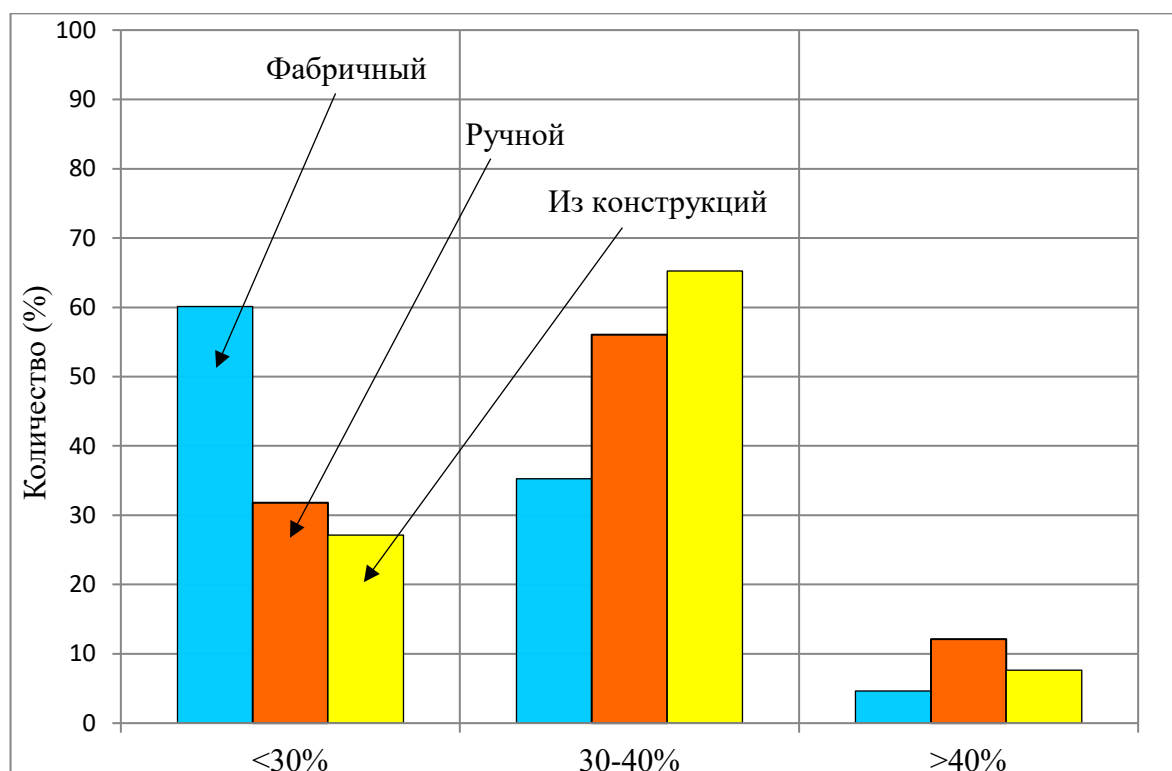


Рисунок 5.12 – Распределение пористости кирпичей по литературным источникам

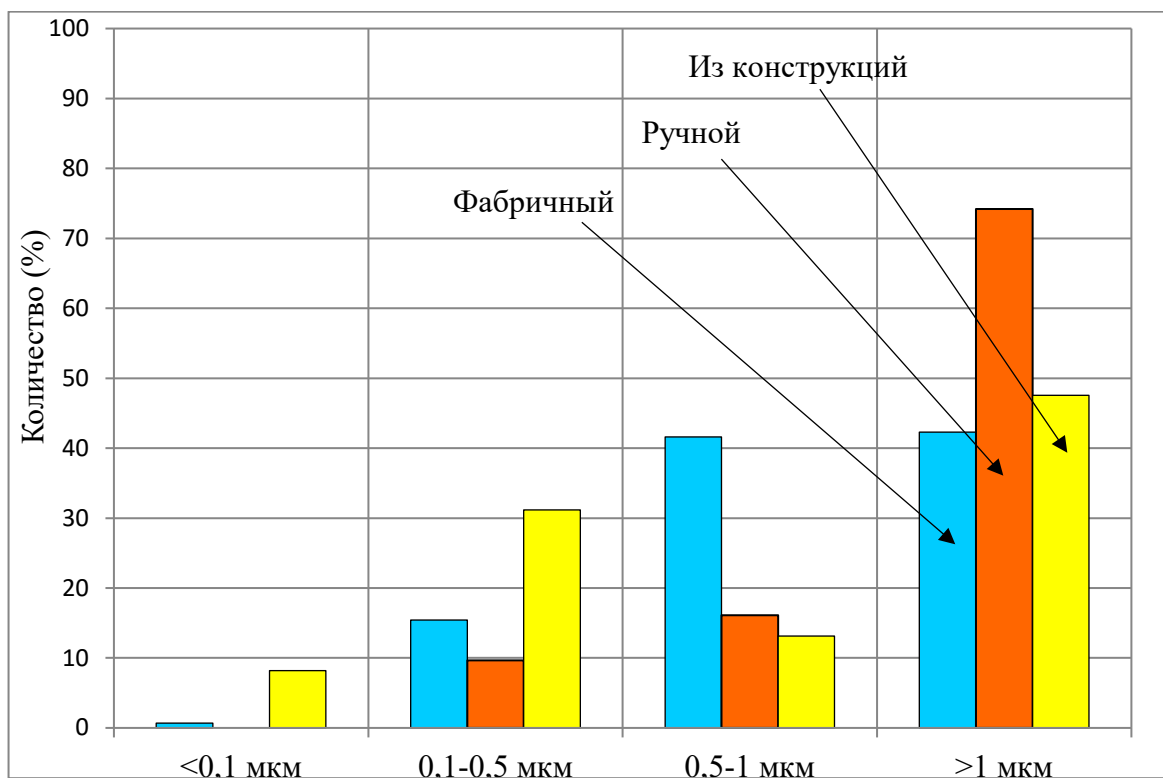


Рисунок 5.13 – Распределение среднего размера пор кирпичей по литературным источникам

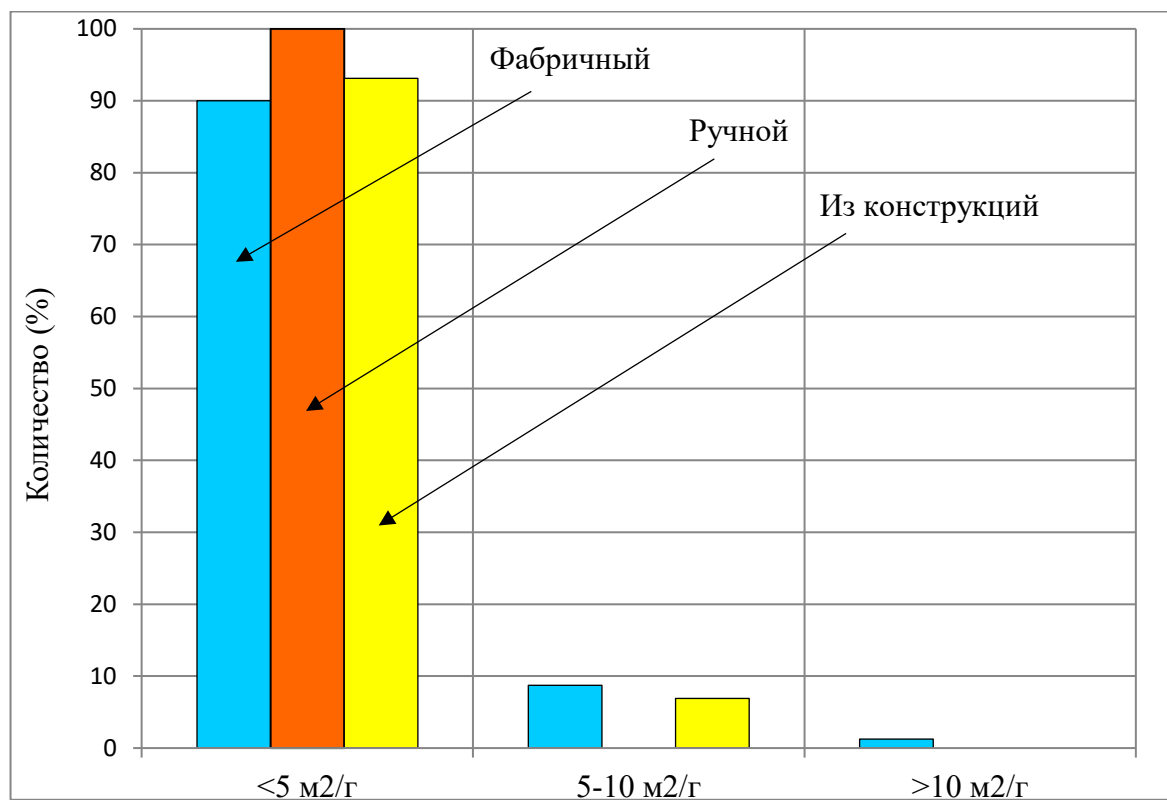


Рисунок 5.14 – Распределение удельной поверхности кирпичей по литературным источникам

Таблица 5.5 – Соотношение значений (%) пористости кирпича (%). $P_{o-ср}$ - средние значения

	Фабричный	Ручной	Из конструкций
Всего (шт)	173	66	118
$P_{o-ср}$	27,5	31,8	32,2
< 30	60	32	27
30–40	35	56	65
> 40	5	12	8

Таблица 5.6 – Соотношение значений (%) среднего размера пор (мкм) кирпича. $d_{ср-ср}$ - средние значения

	Фабричный	Ручной	Из конструкций
Всего (шт)	149	31	61
$d_{ср-ср}$	1,4	1,7	1,5
< 0,1	1	0	8
0,1–0,5	15	10	31
0,5–1	42	16	13
> 1	42	74	48

Таблица 5.7 – Соотношение значений (%) удельной площади поверхности (m^2/g) кирпича. $S_{уд-ср}$ - средние значения

	Фабричный	Ручной	Из конструкций
Всего (шт)	80	3	29
$S_{уд-ср}$	2,1	0,4	2,5
< 5	90	100	93
5–10	9	0	7
> 10	1	0	0

Данных по сорбционным характеристикам кирпича немного. К. Ф. Фокин приводит для кирпича значение 0,53% [62]. L. A. Palmer указывает, что хорошо обожженный кирпич сорбирует очень мало влаги из воздуха или не сорбирует вовсе [285]. В исследованиях группы М. Karoglou, а также в работе Р. Nieminen'a указывается, что сорбция кирпича не превышает 1% [217; 277]. Р. К. Larsen приводит изотермы сорбции трех разных кирпичей, для которых максимальные сорбционные значения составляют 0,4–1% [234].

Конкретных данных по свойствам известковых растворов немного, в особенности мало данных по растворам, отобраным из памятников архитектуры. Доступные для автора работы данные представлены в таблицах по двум категориям: растворы, отобранные из конструкций [82; 103; 284; 343; 358] и новые растворы, специально изготовленные для исследований [113; 138; 168; 231; 235; 248; 272; 275; 279; 358; 359]. Сравнительные характеристики раствора по пористости и среднему размеру пор приведены на Рисунках 5.15, 5.16 и в Таблицах 5.8, 5.9.

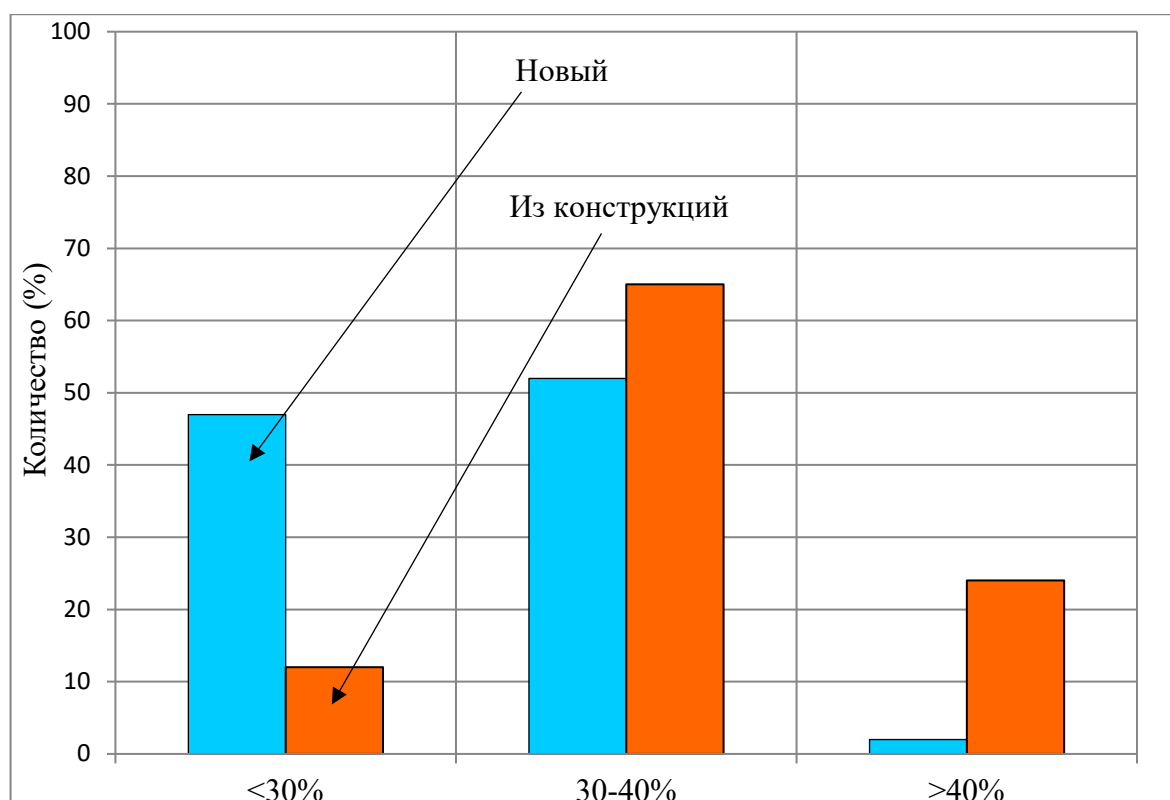


Рисунок 5.15 – Распределение пористости растворов по литературным источникам

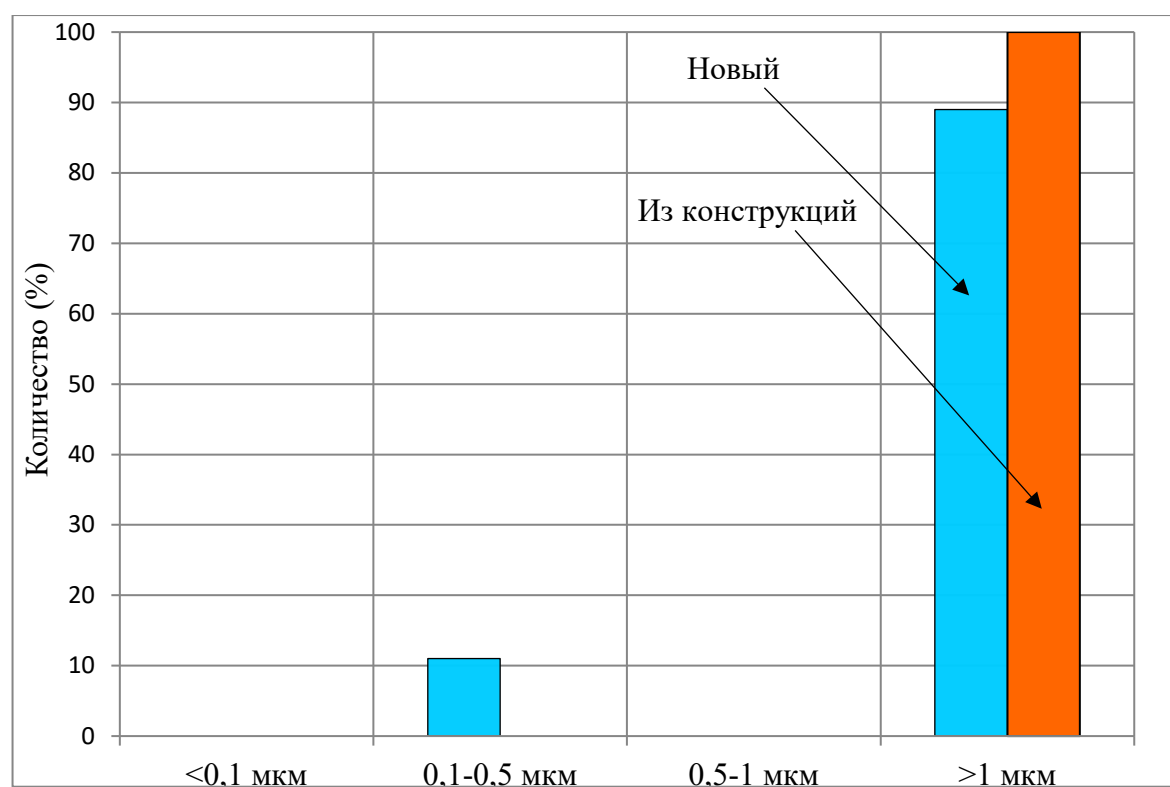


Рисунок 5.16 – Распределение среднего размера пор растворов по литературным источникам

Таблица 5.8 – Соотношение значений (%) пористости раствора ($P_{o-ср}$ - средние значения)

	новый	из конструкций
Всего	60	17
$P_{o-ср}$	30	35
< 30	47	12
30–40	52	65
> 40	2	24

Таблица 5.9 – Соотношение значений (%) размера пор (мкм) ($d_{ср}$ - средний, d_m - медианный, d_l - основного пика) раствора. $d_{i-ср}$ - средние значения

	новый			из конструкций		
	$d_{ср}$	d_m	d_l	$d_{ср}$	d_m	d_l
Всего	9	10	15	1	3	1
$d_{i-ср}$	2,2	0,8	0,6	3,62	0,11	0,25
< 0,1	0	0	0	0	66	0
0,1–0,5	11	0	20	0	33	100
0,5–1	0	80	73	0	0	0
> 1	89	20	7	100	0	0

Удельная площадь поверхности определялась по 5 образцам, за отсутствием большего количества данных [328]. Значения распределяются в диапазоне 0,87–2,48 м²/г со средним показателем – 1,7 м²/г. Сорбционные характеристики традиционных известковых растворов исследовала только группа М. Karoglou, указывающая, что максимальные значения сорбции известкового раствор не превышают 1,9% [217].

Сопоставление данных из литературных источников с данными по исследуемым материалам показало, что каких-либо явных различий в значениях пористости не наблюдается. Большинство кирпичей ручного изготовления и кирпичей, отобранных из конструкций, имеют пористость в диапазоне 30–40%, а большинство из оставшихся – менее 30%. И только несколько процентов имеют пористость выше 40%. Практически такое же распределение соответствует и исследуемым образцам, вплоть до совпадения по процентам в группах. Пористость фабричных кирпичей несколько отличается в сторону уменьшения, поскольку часть кирпичей имеет пористость менее 20%. Однако это не слишком существенно меняет общую картину, поскольку средние показатели все равно остаются в районе 30%.

Пористость нового раствора распределена практически равномерно в диапазоне от 20 до 40%, с концентрацией большинства образцов в районе 30%. Практически идентичную картину можно видеть и по экспериментальным данным. Большая часть (74%) всех значений пористости находится в диапазоне 30–40%.

26% попадает в диапазон ниже 30%, и лишь одно значение выходит за пределы выше 40%. Исходя из этого можно сделать вывод, что пористость исследуемых образцов, в сравнении с материалами по литературным источникам, существенно не изменилась.

В отличие от пористости, данные по среднему размеру пор по литературным источникам существенно отличаются от данных, полученных экспериментально. Средний размер пор большей части кирпичей ручного изготовления находится в микронной зоне, фабричного изготовления – выше 0,5 мкм. Даже для кирпича, отобранного из исторических конструкций, по литературным данным, около половины всех значений остаются выше 1 мкм. С другой стороны, практически отсутствуют данные по кирпичам со средним размером пор в нанометрической зоне: в группе ручных кирпичей таких нет, фабричных – присутствует только один, в группе кирпичей из исторических конструкций – 5 образцов (8%).

Для исследуемых нами материалов наблюдается иная тенденция. Более чем для половины всех объектов (52%) количество образцов кирпича со средним размером пор меньше 0,1 мкм составляет 30–50%. А для более чем трети объектов (39%) количество образцов со средним размером пор менее 0,1 мкм превышает 50%. И лишь для двух объектов количество таких образцов остается меньше 20%. Для наглядности на Рисунке 5.17 приведено сопоставление значений среднего размера пор новых кирпичей со значениями среднего размера пор образцов кирпича трех объектов, разной степени увлажненности. Следует отметить, что здесь и далее на всех графиках, приводятся данные по вторичной сорбции, т. е. для очищенных образцов. Данные по первичной сорбции (образцы с примесями) еще существенно отличаются от данных по литературным источникам.

Идентичная картина наблюдается и по раствору. Значения среднего размера пор нового известкового раствора находятся в микронного диапазоне. Все значения среднего размера пор образцов раствора исследуемых объектов находятся в нанометрической зоне (Рисунок 5.18).

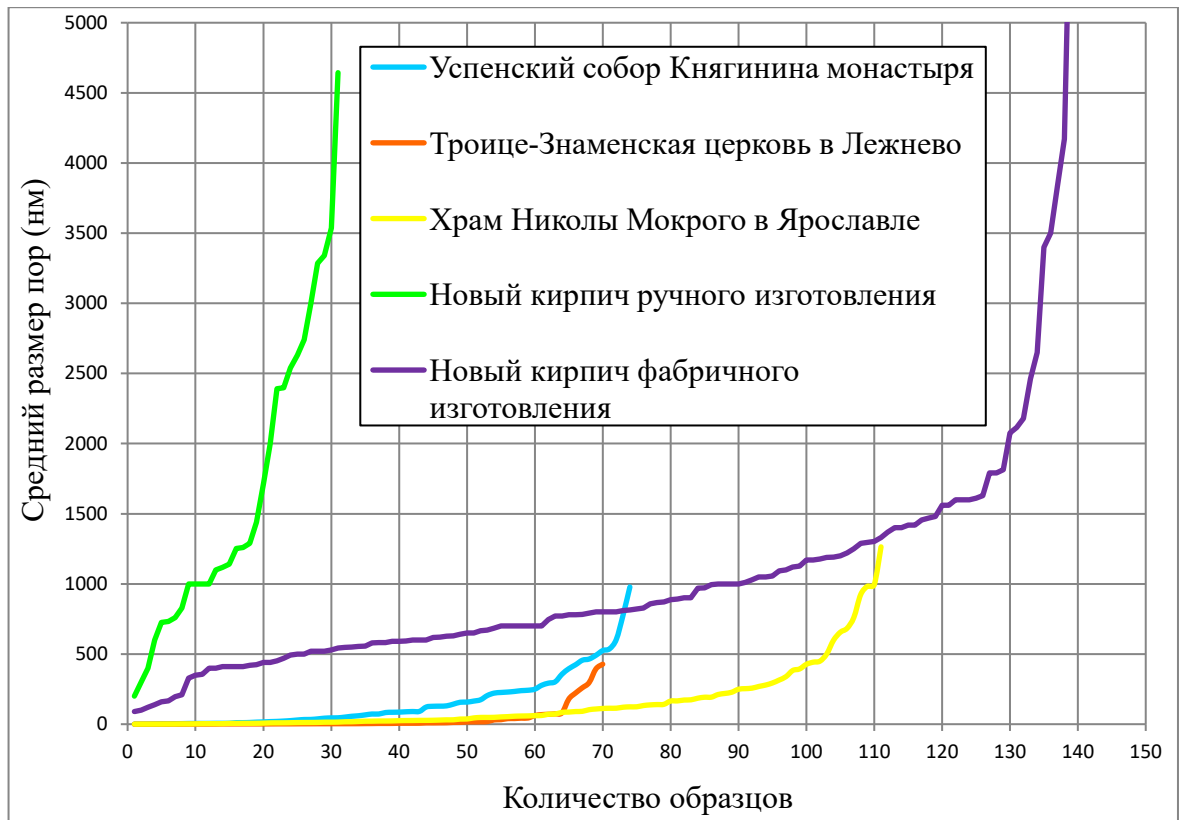


Рисунок 5.17 – Сопоставление среднего размера пор кирпичей

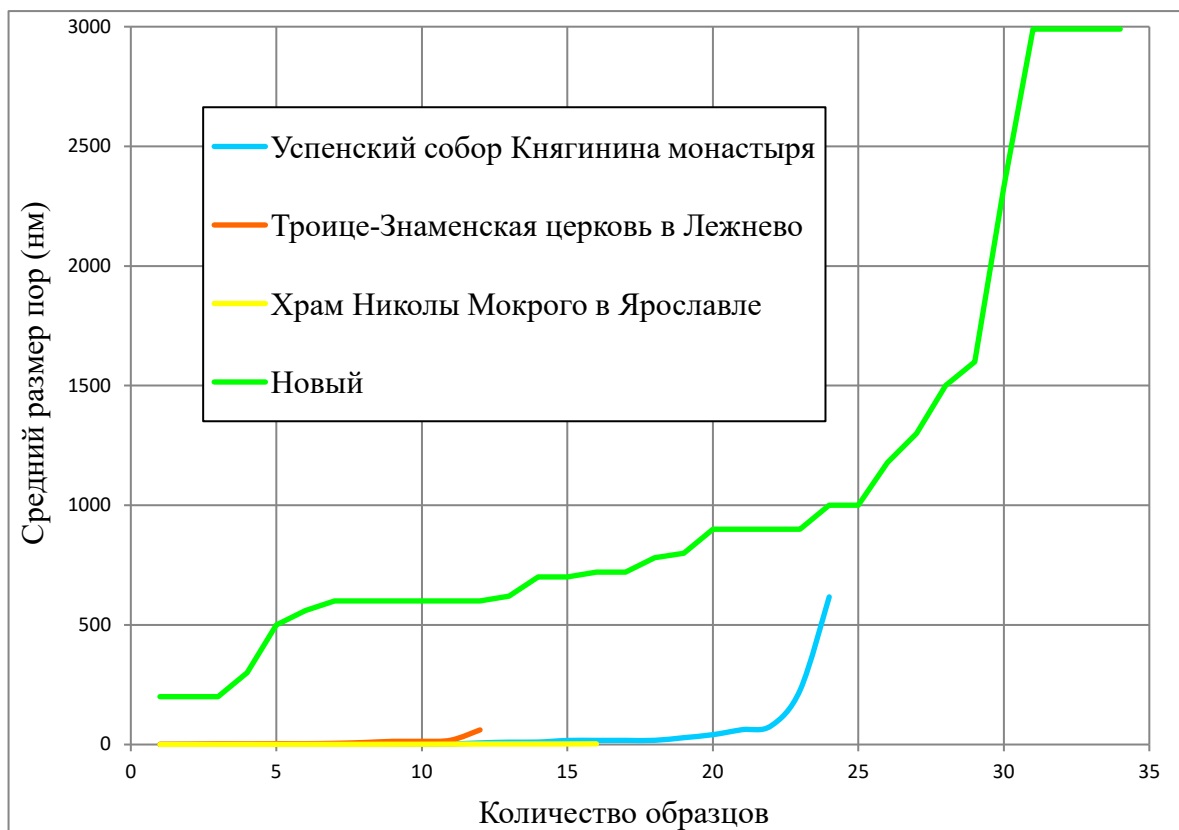


Рисунок 5.18 – Сопоставление среднего размера пор растворов

Учитывая приведенные факты, можно говорить о явной тенденции к снижению среднего размера пор исследованных нами материалов, как кирпича, так и раствора. Отсутствие выявленной тенденции по литературным источникам для кирпичей, отобранных из исторических конструкций, по всей вероятности, связано со стремлением исследователей работать с цельными кирпичами в отрыве от влажностных характеристик, что неизбежно приводит к концентрации внимания на наиболее хорошо сохранных участках без признаков деструкции.

По удельной поверхности для кирпичей ручного изготовления есть данные только по трем образцам, с показателями 0,4 м²/г. Для фабричных кирпичей значения удельной поверхности, в основном (90%) не превышают 5 м²/г; 9% не превышают 10 м²/г и только один кирпич имеет удельную площадь, достигающую 12,3 м²/г. Аналогичная картина наблюдается и по кирпичам, отобранным из исторических конструкций, удельная площадь поверхности большинства которых (93%) находится в диапазоне до 5 м²/г. При этом, оставшиеся 7% имеют удельную поверхность в диапазоне 5–10 м²/г, тогда как образцы с более высокими значениями отсутствуют.

Для исследуемых объектов в границах ниже 5 м²/г остаются меньше половины образцов (35/48%, первое значение соответствует данным по первичной сорбции, второе значение – по вторичной); 35/30% средних значений удельной поверхности уходят в диапазон 5–10 м²/г, а 30/22% – выше 10 м²/г. На Рисунке 5.19 приведено сопоставление значений удельной площади поверхности новых кирпичей со значениями удельной площади поверхности образцов кирпича трех объектов разной степени увлажненности. Удельная поверхность новых растворов находится в пределах 2,5 м²/г. Удельная поверхность большинства исследуемых растворов превышает 5 м²/г (Рисунок 5.20). На этом основании можно говорить о достаточно явной тенденции возрастания удельной площади поверхности исследованных нами материалов.

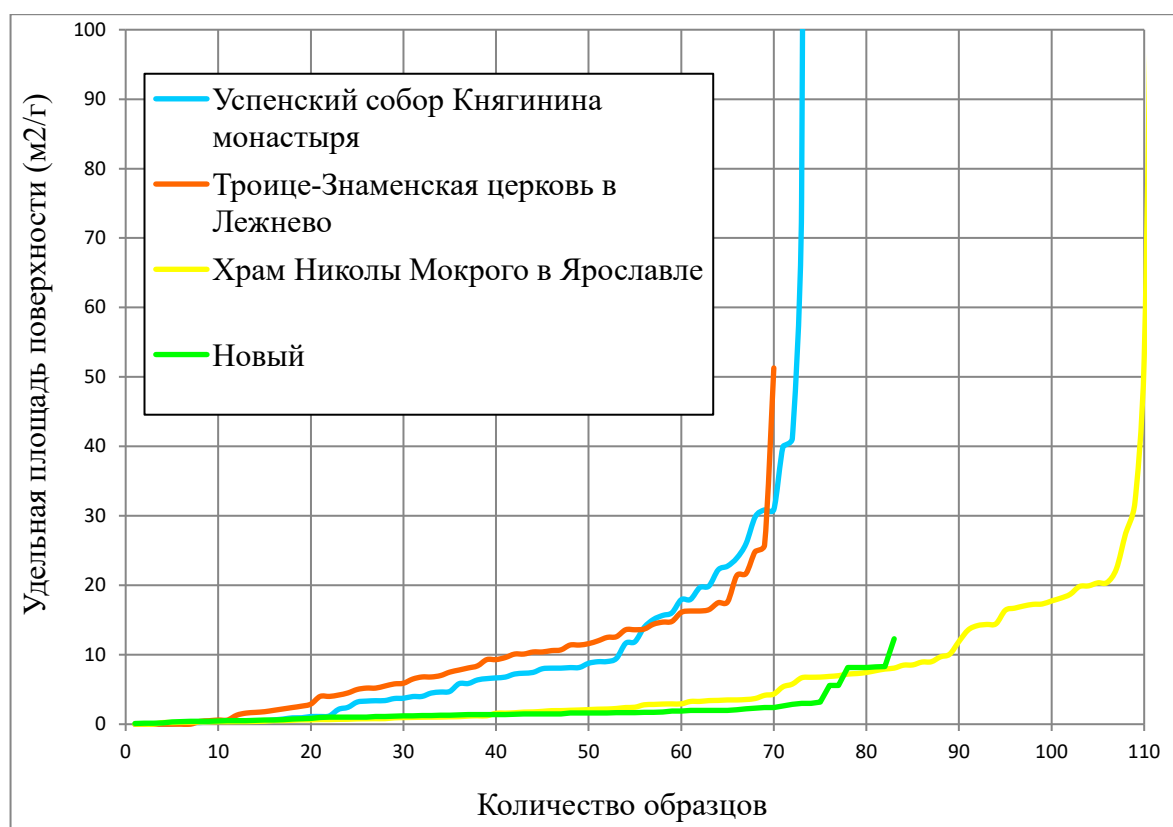


Рисунок 5.19 – Сопоставление удельной поверхности кирпича



Рисунок 5.20 – Удельная площадь поверхности исследуемых растворов

Максимальная сорбция новых кирпичей находится в пределах 1%. Сорбционные показатели исследованных нами кирпичей существенно выше, как можно из представленного на Рисунке 5.21. Максимальные значения сорбции нового раствора находятся в пределах 2%. Максимальные значения сорбции исследованных нами образцов раствора достигают 5–15% (Рисунок 5.22). Отсюда можно сделать вывод, что сорбционные показатели исследуемых материалов также существенно возрастают.

Сопоставление свойств пористой системы материалов на основании данных, полученных из литературы со свойствами исследованных нами образцов, позволяет сделать следующие выводы:

- Пористость исследуемых материалов, в целом, не претерпела каких-либо явных изменений;
- Остальные физические свойства исследуемых материалов, в частности, средний размер пор, удельная поверхность и сорбционные характеристики претерпели явные изменения. Средний размер пор существенно уменьшился, тогда как удельная поверхность и сорбционные характеристики возросли. Полученные нами данные [70] позволяют заключить, что физические свойства исследуемых материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН, за исключением пористости, не относятся к изначальным и являются следствием изменения пористой структуры под влиянием влаги.

5.5. Трансформация микроструктуры материалов каменной кладки исторических конструкций объектов культурного наследия. Выявление механизма разрушения

Для выявления причины изменений свойств материалов кладки исторических конструкций были рассмотрены механизмы влияния физического разрушения на пористую систему.

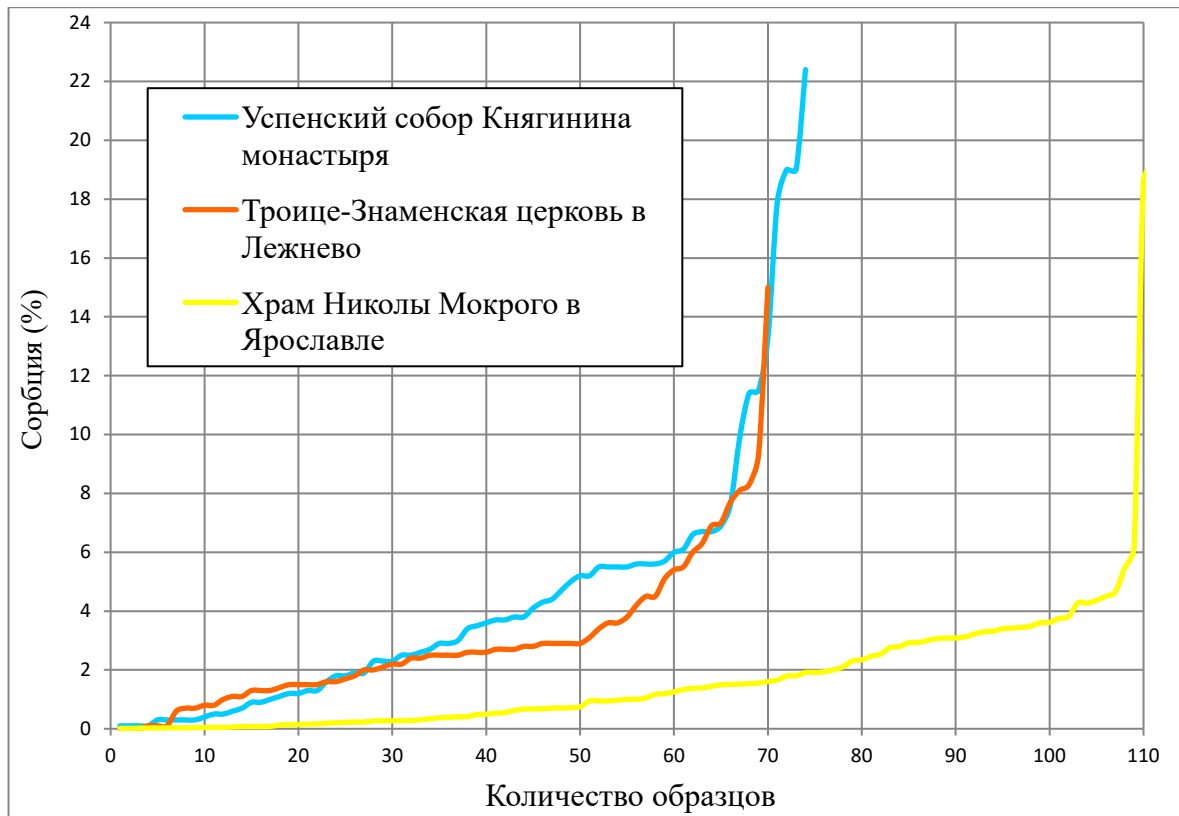


Рисунок 5.21 – Максимальная сорбция исследуемых образцов кирпича

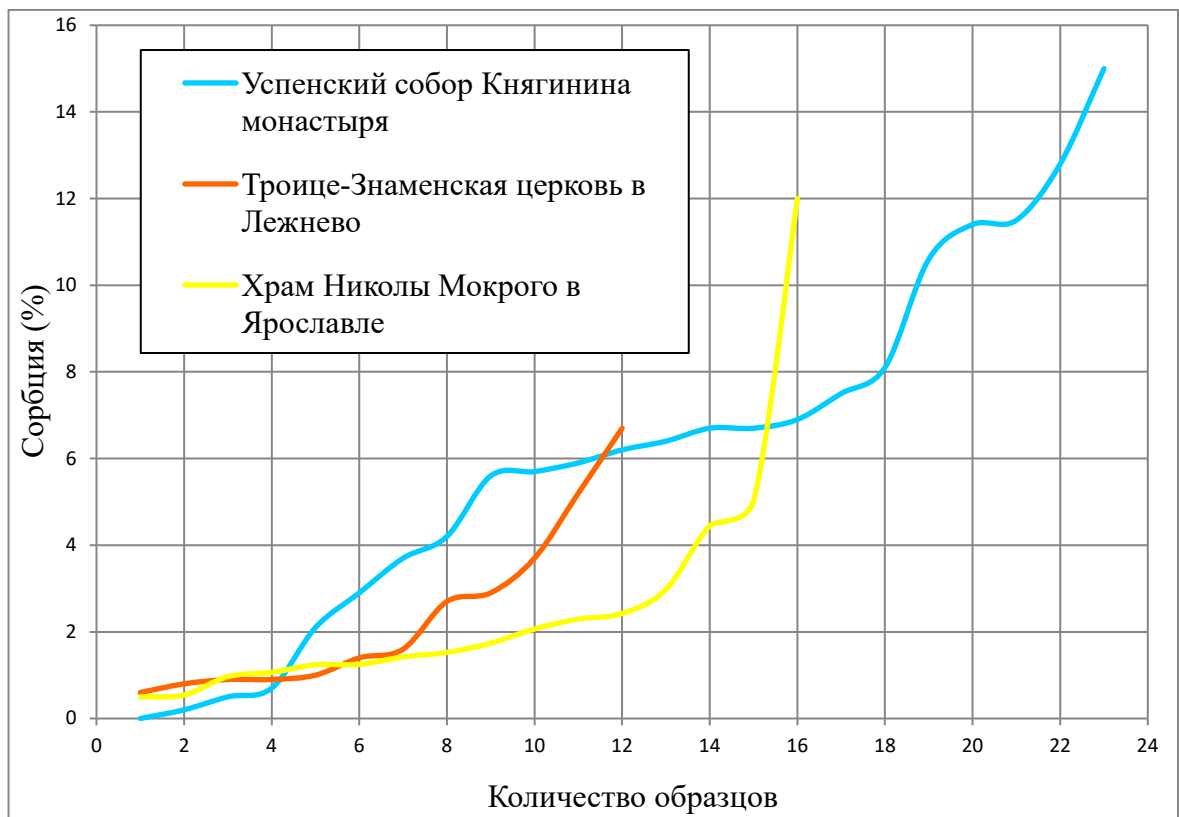


Рисунок 5.22 – Максимальная сорбция исследуемых образцов раствора

Из литературного обзора, представленного в главе 1 можно заключить, что наиболее опасными механизмами разрушения для кладочных материалов являются кристаллизационный и усадочно-деформативный.

Кристаллизационный механизм включает в себя два типа разрушения: солевой и морозный. Процесс разрушения вызывается ростом в поре инородного тела, в случае солевого разрушения – кристалла соли, в случае морозного разрушения – кристалла воды. В обоих случаях рост кристалла становится возможным в результате того, что инородному телу термодинамически невыгодно входить в контакт с основным материалом, т. е. со стенкой поры. Это приводит к тому, что между кристаллом и поверхностью поры сохраняется дистанция в несколько нанометров в виде пленки жидкости, служащей путем поступления строительного материала для роста кристалла [146; 154; 159; 160; 306; 321; 333; 344]. Растворимость кристалла при прочих равных зависит от его размера. Поэтому сочетание в одной системе кристаллов разных размеров приведет к их постепенному перераспределению, в процессе которого более мелкие кристаллы (находящиеся под атмосферным давлением) будут растворяться и поставлять материал для роста более крупных кристаллов (находящихся, тем самым, под повышенным давлением). Иными словами, крупные кристаллы будут расти за счет мелких [125; 345]. Более того, растворимость разных граней одного и того же кристалла может различаться если эти грани имеют разную кривизну, что происходит в случае, так называемых, бутылочных пор, т. е. пор с узкими горлами. В тот момент, когда крупный кристалл полностью заполнит пространство поры, между ним и стенкой будет продолжать сохраняться пленка жидкости. Давление, которое он будет оказывать на стенку пору будет пропорционально степени пересыщенности поступающего через эту пленку раствора. Степень пересыщенности, в свою очередь зависит от размеров мелких кристаллов или, более точно, размеров горла пор [332]. Достаточно высокое давление развивается только в случае размера горла менее 0,1 мкм [155; 200; 316]. Таким образом, в случае кристаллизационного механизма разрушения важны не сами размеры пор, а

сочетание микропор с более крупными порами [319; 322; 323; 345], как еще в 1979 году определил R. U. Cooke [132].

Усадочно-деформативный механизм связан с деформацией структуры материалов с размерами пор менее 0,1–0,2 мкм [172; 302] под влиянием процессов увлажнения / высыхания, поскольку в порах подобных размеров поверхностные силы доминируют над остальными физическими явлениями [72; 176; 219; 222; 240; 290]. Чем более микропористый материал, тем более он подвержен изменению своих свойств [164; 166; 184; 294]. Группа E. Barsotti наглядно продемонстрировала как адсорбционная деформация меняет форму пор песчаников, известняков и доломитов [86]. Ряд исследователей сходится на мнении, что для определенных видов материалов циклы увлажнения / высыхания являются основным механизмом разрушения [250; 252; 260; 261; 270; 288; 294; 320; 351; 374; 375]. При этом следует учитывать и тот факт, что в случае с материалами с высокой степенью микропористости для достижения насыщения не требуются источники жидкой влаги, достаточно увеличить относительную влажность воздуха до 90–95% [127]. Влияние усадочно-деформативного механизма проявляется в изменении структуры пор в сторону возрастания микротрещиноватости и микропористости [183; 193; 360], а поскольку возрастание микропористости усиливает деструктивное воздействие, то механизм адсорбционного разрушения является саморазвивающимся [205].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что для развития, как кристаллизационного, так и усадочно-деформативного механизмов необходимо наличие двух факторов: влаги и микропор менее 0,1–0,2 мкм.

Кладка как строительная конструкция представляет собой набор блоков, скрепленных раствором. Блоки могут быть как естественного (камни), так и искусственного (кирпич) происхождения. Но и те, и другие не могут полностью совпадать по своим свойствам с раствором. Как можно видеть из раздела 6.2 пористость у кирпича и раствора существенно не различается, составляя, в среднем, 25–35%, а вот размер пор может различаться достаточно значительно. Хорошо обожженный кирпич ручного изготовления имеет один ярко выраженный

пик пор в районе 1–3 мкм; известковый раствор может иметь несколько пиков пор в диапазоне от 0,1 до 100 мкм [69]. Таким образом, в формате новой кладки не выполняется один из двух сформулированных выше критериев, необходимых для эффективного включения механизмов разрушения – наличие микропор. С другой стороны, результаты наших исследований показывают, что для материалов каменной кладки исторических конструкций наличие микропор является общей тенденцией. Отсюда возникает два базовых вопроса: как функционируют механизмы разрушения в отсутствие микропор, и за счет какого механизма происходит уменьшение размеров пор.

Как было показано в главе 4, совмещение материалов с разными свойствами приводит к возникновению комплексной системы с трудно прогнозируемыми свойствами [117; 174; 175; 192]. Ситуация осложняется еще и тем обстоятельством, что раствор укладывается в жидком виде и высыхает уже внутри конструкции. Свежий раствор, фактически, представляет собой суспензию [162; 173; 186]. При соприкосновении с кирпичом, даже предварительно выдержанном в воде, влага из раствора начинает активно мигрировать в поры кирпича [71; 131; 133; 144; 236; 362; 380]. Крупные частицы заполнителя оказываются достаточно тяжелыми для транспортировки и остаются на месте. Более же легкие частицы связующего легко проникают вместе с водой в поверхностный слой кирпича, создавая пограничный слой, состоящий, фактически из одного связующего. Таким образом, можно принять, что на границе с кирпичом будут только поры, характерные для известковой пасты, т. е. в диапазоне 0,1–2 мкм. Наше представление совпадает с изложенным в [105; 108; 188; 206; 207; 267; 314].

Необходимо отметить и тот факт, что сопряжение разных материалов, даже с идентичными свойствами, не может дать идеального контакта с точки зрения течения жидкости. Тем более идеального контакта невозможно достичь в случае материалов с разными свойствами. Поэтому часть пограничной поверхности на стыке материалов, как правило, связана с образованием пустот [109; 121; 126; 141; 145; 165; 353; 382; 385]. Нельзя забывать также, что для кладки в принципе свойственно наличие не полностью заполненных раствором вертикальных швов

[42]. Исходя из сказанного можно предполагать три разных компоновки пор при стыковке кирпича с раствором:

- Примерное совпадение пор по размеру, не препятствующее перемещению влаги в жидком виде;
- Резкий перепад пор по размеру или наличие пустотности, препятствующих перемещению адвекции жидкости;
- Поры одного из элементов попадают не на поры, а на минеральную поверхность другого элемента. Формирование тупиковых пор.

Первая компоновка обеспечивает сквозную миграцию жидкости, соответственно, именно эти участки отвечают за высоту капиллярного подсоса влаги конструкции в целом. Третья компоновка полностью блокирует воду. Обе компоновки не создают предпосылок для развития механизмов разрушения при циклическом увлажнении поэтому не представляют интереса для рассмотрения в дальнейшей работе. При второй компоновке, т. е. при отсутствии сопоставимых пор, высота подсоса ограничивается первым – вторым блоками, как показывают наши расчеты, совпадающие также с экспериментальными результатами исследований кладки на цементном растворе [110; 111; 112; 384]. При резком перепаде размера пор или наличии пустотности перемещение жидкости блокируется, и участок становится потенциальной зоной испарения [299; 300]. Если более мелкие поры принадлежат раствору, то зона испарения формируется в процессе капиллярного подсоса, поскольку поступление влаги в кладку всегда происходит через раствор, как непрерывную фазу. Если более мелкие поры принадлежат кирпичу зона испарения формируется в процессе высыхания предварительно насыщенных участков.

Рассмотрим возможные варианты реализации механизмов разрушения при циклическом увлажнении в подобных ситуациях. Поскольку мы учитываем только участки, доступные для увлажнения из внешних источников, то предполагается, что моделируемые поры постоянно или периодически будут наполнены жидкостью. Проанализируем ситуацию, когда более мелкие поры относятся к раствору. Поскольку раствор является непрерывной фазой, то жидкость, по всей

вероятности, будет поступать со стороны раствора, тогда как более крупные поры кирпича будут оставаться пустыми. Их заполнение возможно, но обходными путями, со стороны сети более мелких пор кирпича.

Вода в грунте и, соответственно, в порах строительных материалов, никогда не бывает в чистом виде, она всегда несет в себе частицы почвы, соли и микрообломки материалов. При блокировании на границе она начинает постепенно испаряться, тогда как содержащиеся в ней примеси осаждаются, постепенно заполняя поры и уменьшая их размер. На основании проведенных исследований можно следующим образом представить происходящие процессы в теле материала (Рисунки 5.23–5.28).

Если изначально, в момент возведения конструкции, большинство пор находились в микронной области, то постепенно в результате накопления осаждающихся примесей размер пор уменьшается, и таким образом, рано или поздно переходит границу 0,1–0,2 мкм (Рисунок 5.24). После этого уязвимость данного модельного участка резко возрастет, вследствие возникновения благоприятных условий для включения в работу усадочно-деформативного механизма. Возрастание коэффициента влажностного расширения уменьшившихся пор способствует накоплению усталостных напряжений при циклических колебаниях влажности, что в конечном счете неизбежно приведет к зарождению и развитию в области напряжений сети микротрещин (Рисунок 5.25). Вновь образованные участки с микротрещинами также будут уязвимыми, поскольку будут подвержены тому же усадочно-деформативному механизму разрушения.

Дальнейшее развитие усталостных напряжений будет способствовать зарождению новых и частичному объединению уже имеющихся сетей микротрещин. Последнее приведет к разрушению материала с образованием микрообломков (Рисунок 5.26), способных переноситься вместе с жидкостью к новым зонам испарения. После подобного перераспределения модельный участок вновь изменит свой облик, поскольку произойдет расширение порового пространства за счет разрушенного участка (Рисунок 5.27) [69].

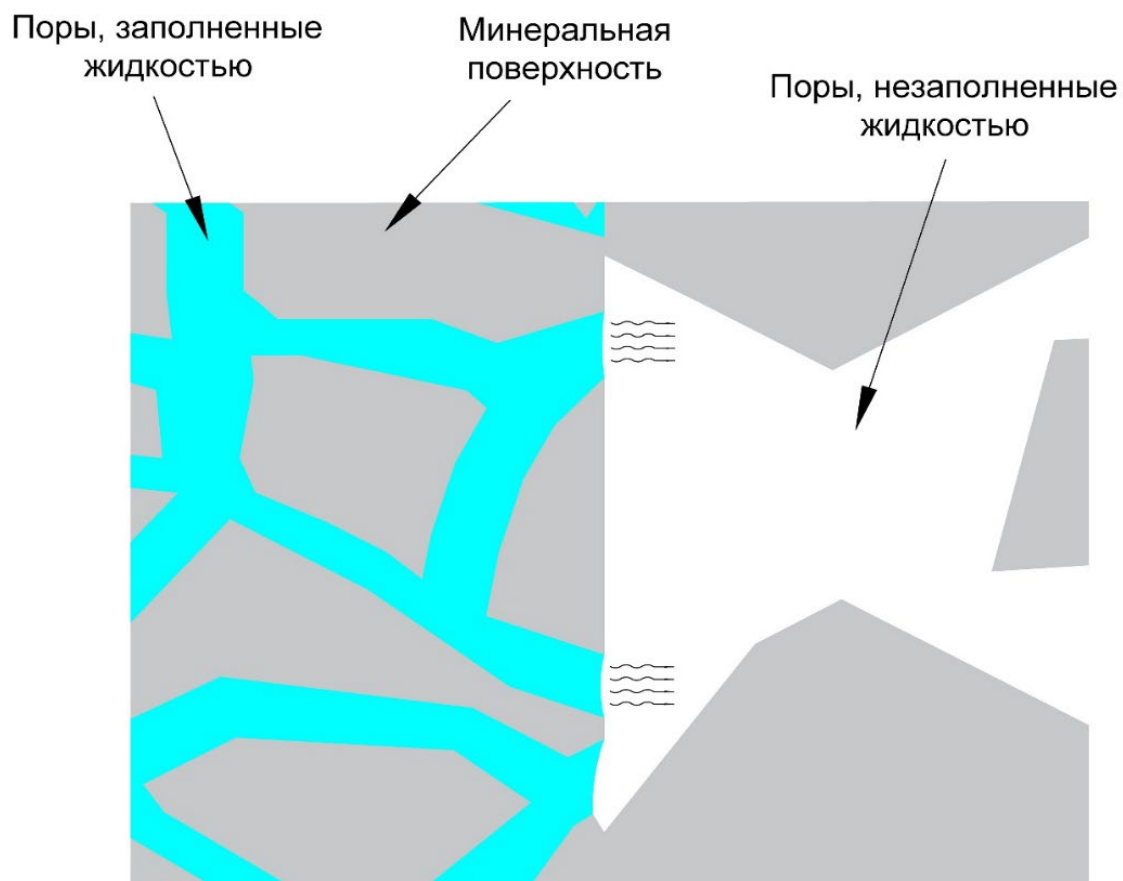


Рисунок 5.23 – Перепад пор на стыке материалов. Возникновение капиллярного барьера

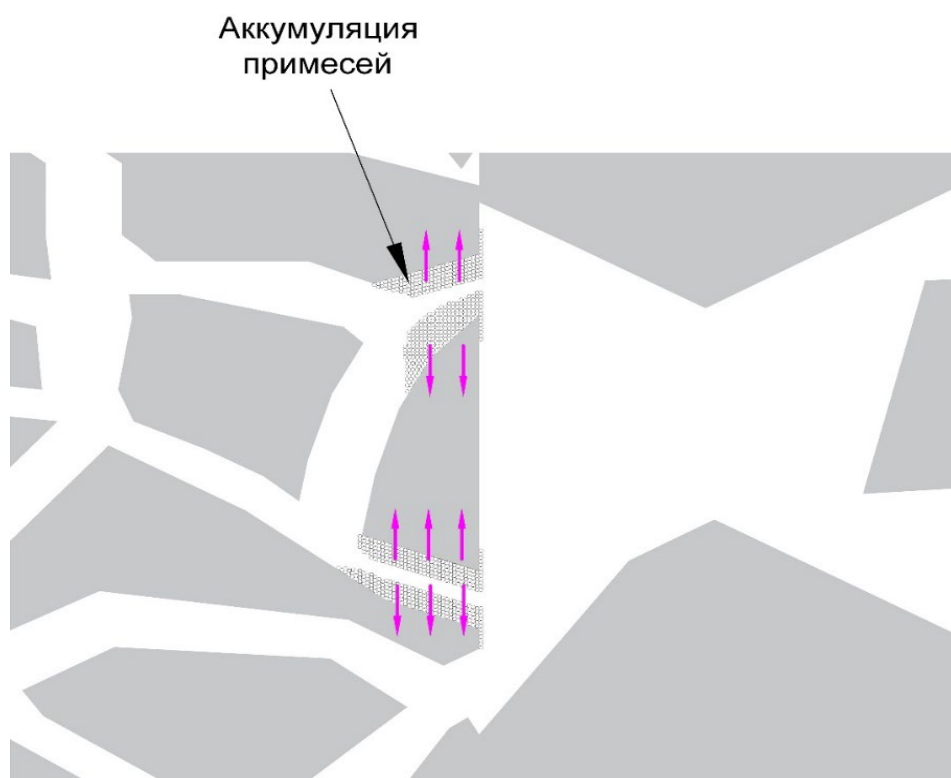


Рисунок 5.24 – Уменьшение размеров пор в результате осаждения примесей. Стрелками условно показаны области возникновения напряжений в материале

Микротрещины

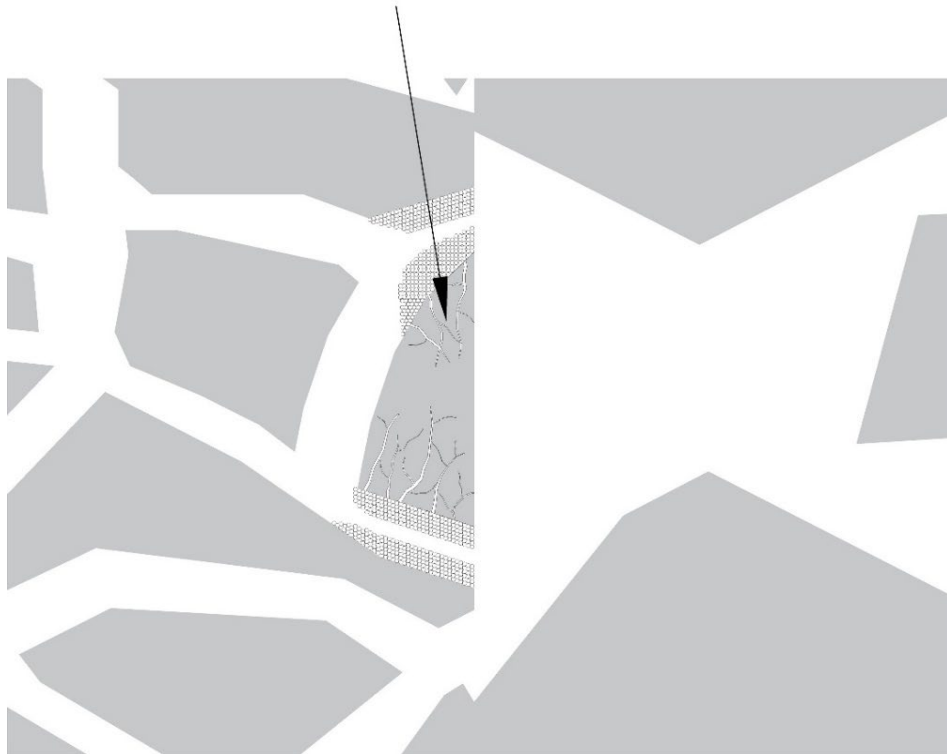


Рисунок 5.25 – Зарождение сети микротрещин в процессе развития усадочно-деформативного механизма

Микрообломки

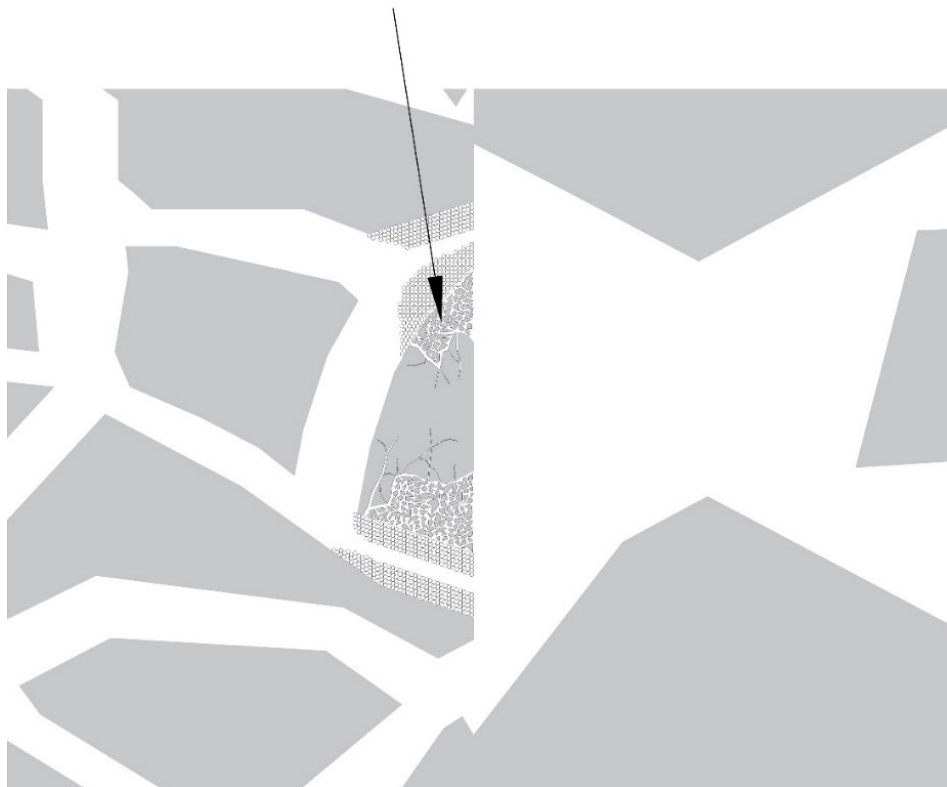


Рисунок 5.26 – Разрушение части стенки пор с образованием микрообломков

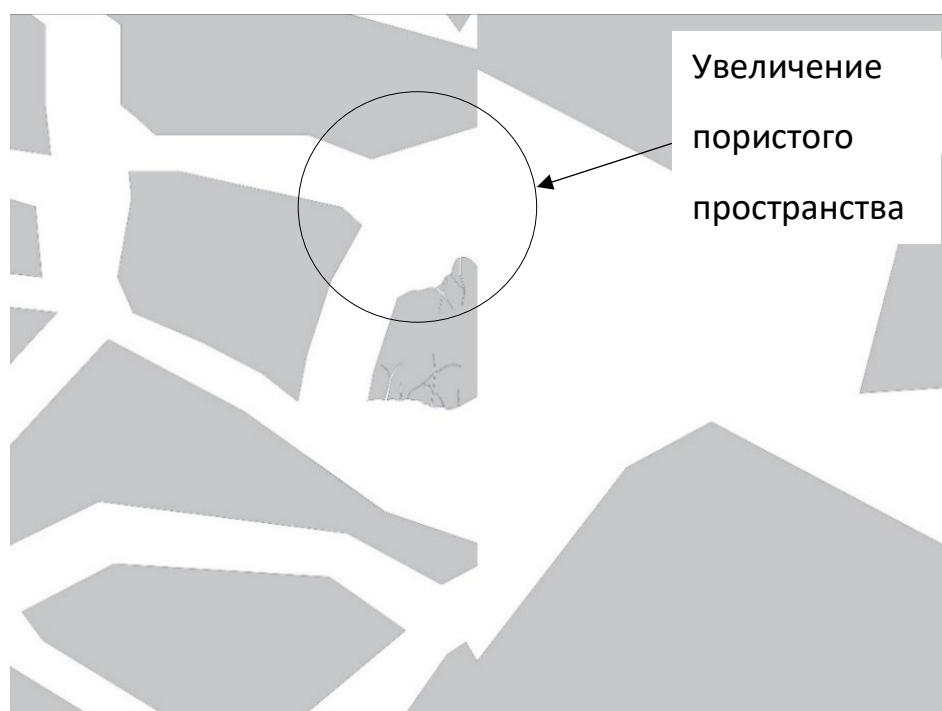


Рисунок 5.27 – Увеличение пористого пространства в результате разрушения поверхностного слоя стенок пор и вымывания микрообломков

Если начало процесса деструкции связано с пограничным пространством, то постепенно, трансформация затронет и поровое пространство основного блока. На Рисунках 5.28–5.32 представлены фотографии образцов кирпича под электронным микроскопом, на которых отчетливо видны сети микро и макротрещины.

В случае присутствия в поступающей в кладку воде ионов солей, а также в случае снижения температуры ниже нулевой отметки, параллельно с усадочно-деформативным механизмом могут возникнуть условия для активизации кристаллизационного механизма разрушения. Следует отметить, что если в первом варианте, т. е. при реализации усадочно-деформативного механизма, основные напряжения приходились на стенки микропоры, поскольку величина расклинивающего давления обратно пропорциональна размеру поры, то во втором варианте, т. е. при реализации кристаллизационного механизма, основные напряжения будут возникать уже в широкой части поры, поскольку рост большого кристалла будет осуществляться за счет растворения мелких кристаллов [69].

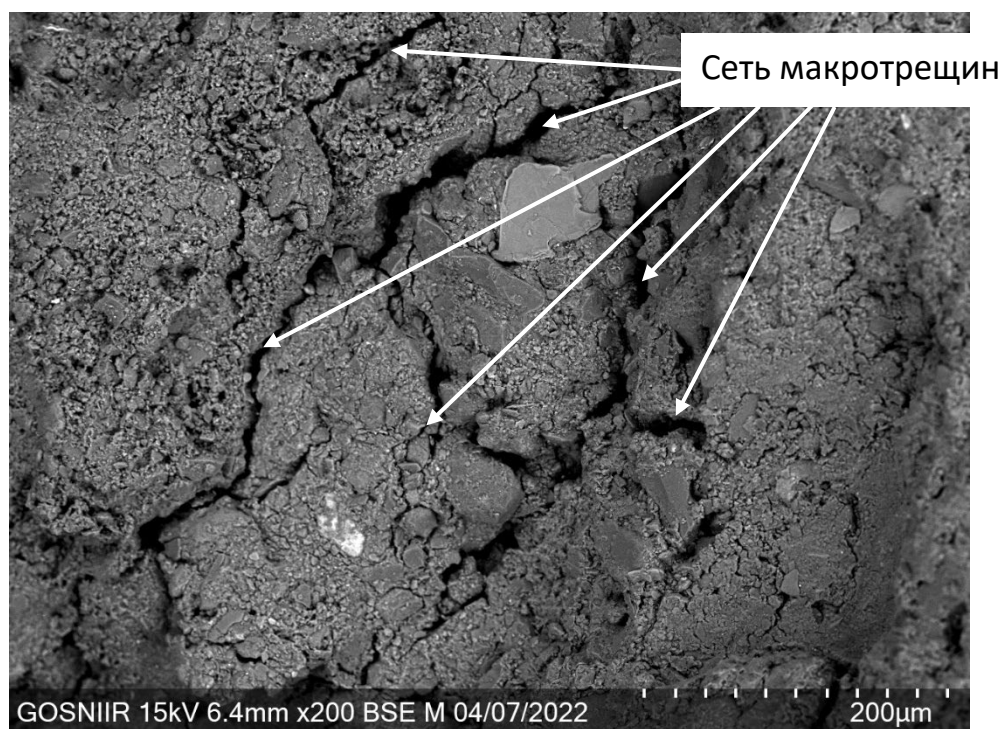


Рисунок 5.28 – Троице-Знаменская церковь в Лежнево. Образец кирпича северной стены с глубины 38 см. Увеличение 200х.

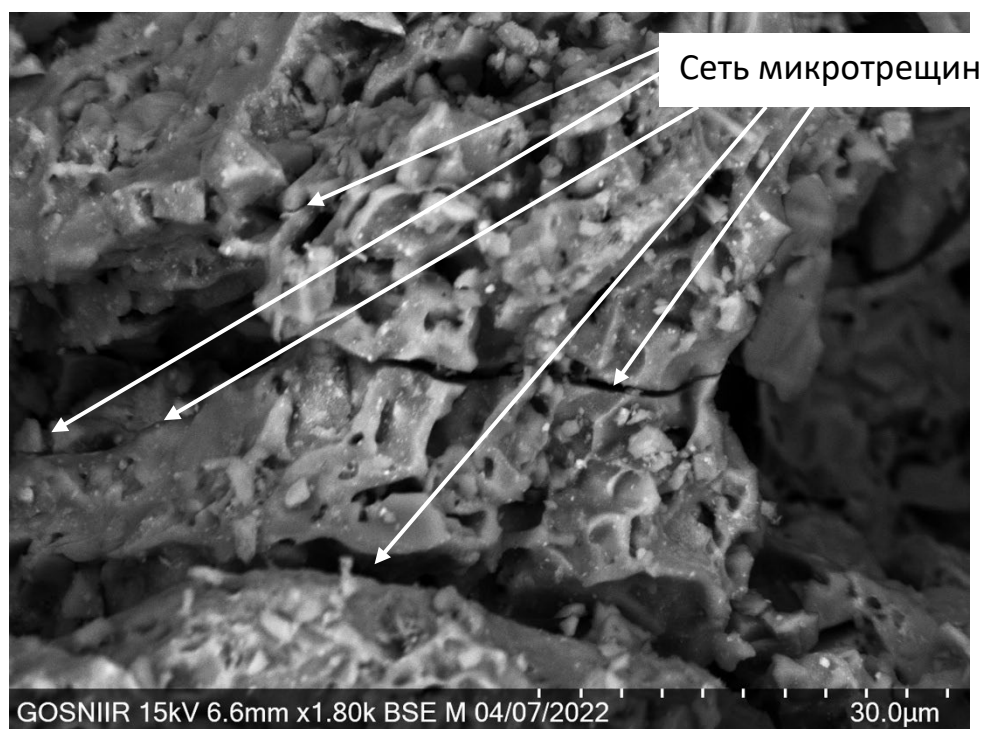


Рисунок 5.29 – Троице-Знаменская церковь в Лежнево. Тот же образец кирпича с увеличением 1800х

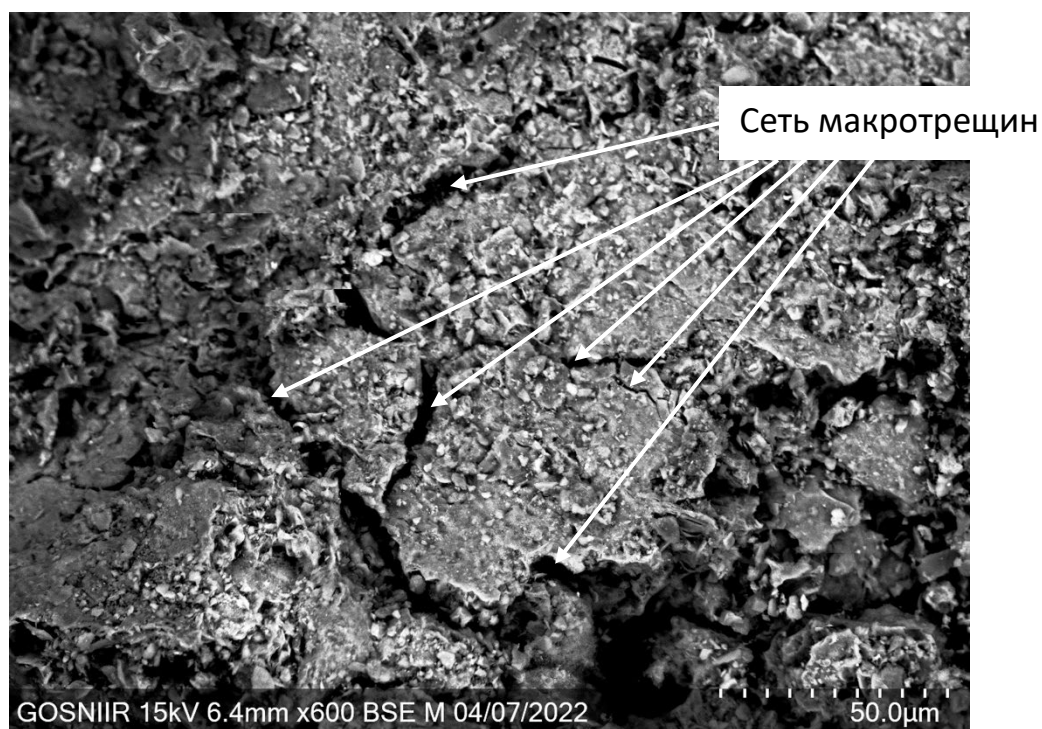


Рисунок 5.30 – Троице-Знаменская церковь в Лежнево. Образец кирпича южной стены с глубины 45 см. Увеличение 600х.



Рисунок 5.31 – Церковь Николы Мокрого в Ярославле. Образец кирпича западной стены с глубины 10 см. Увеличение 500х.



Рисунок 5.32 – Церковь Николы Мокрого в Ярославле. Тот же образец кирпича с увеличением 5000х.

Кристаллы соли / льда легко заполняют объем более крупной поры, сохраняя, однако, пленку жидкости, отделяющую их от минеральной поверхности и позволяющую продолжать рост кристалла (Рисунок 5.33). В этом случае, область напряжений распространится на стенки широкой части поры, где повторятся все представленные выше этапы зарождения, развития и объединения сетей микротрещин.

Следует отметить, что при подобном развитии событий аккумуляция солей будет наблюдаться не только в районе внешней поверхности стены, но и во внутреннем объеме. Данный вывод подтверждается не только косвенно, т. е. наличием внутренних зон испарения, но и прямым распределением солей в объеме кладки. В Таблицах 5.10, 5.11, а также на Рисунках 5.34, 5.35 приведено распределение солей в материалах двадцати трёх горизонтальных сечений кладки стен церкви Николы Мокрого в Ярославле на двух разных высотах, на высоте 0,1 – 0,2 м и на высоте около метра от уровня пола.

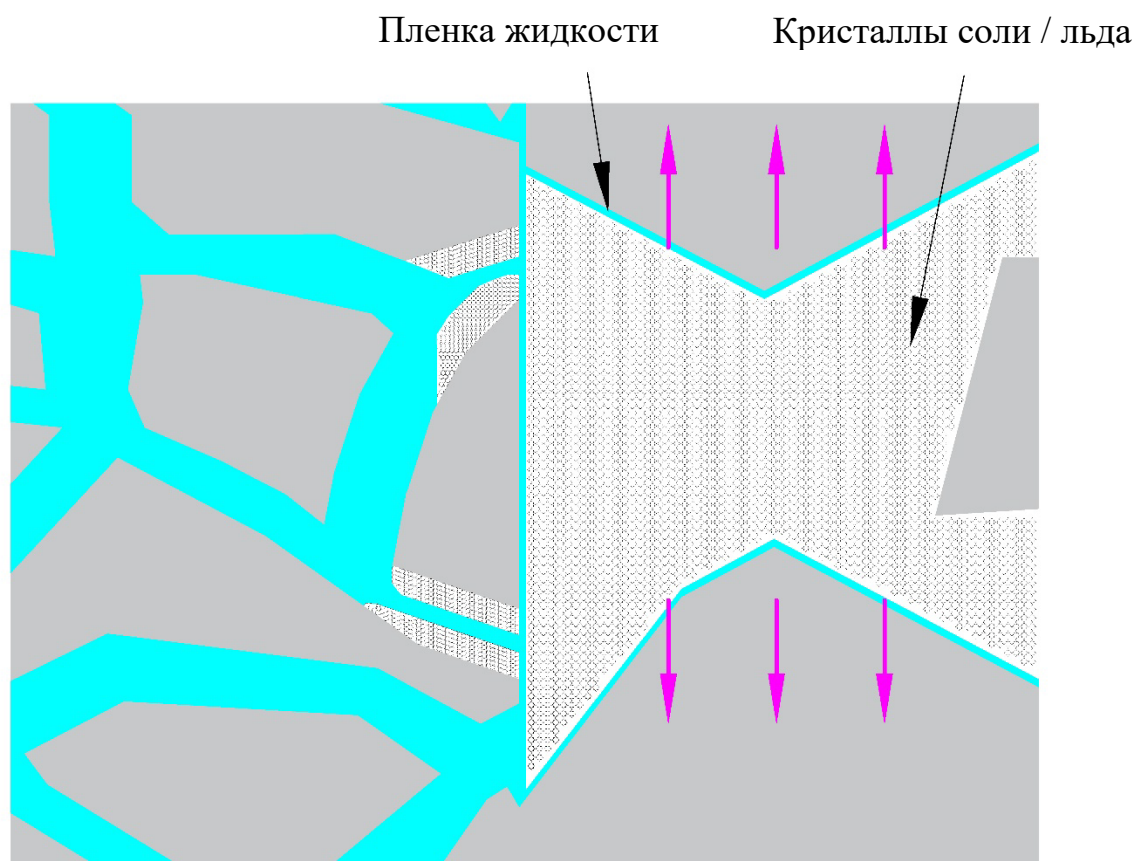


Рисунок 5.33 – Кристаллизационное разрушение в крупной части поры. Стрелками условно показаны области возникновения напряжений в материале

Таблица 5.10 – 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

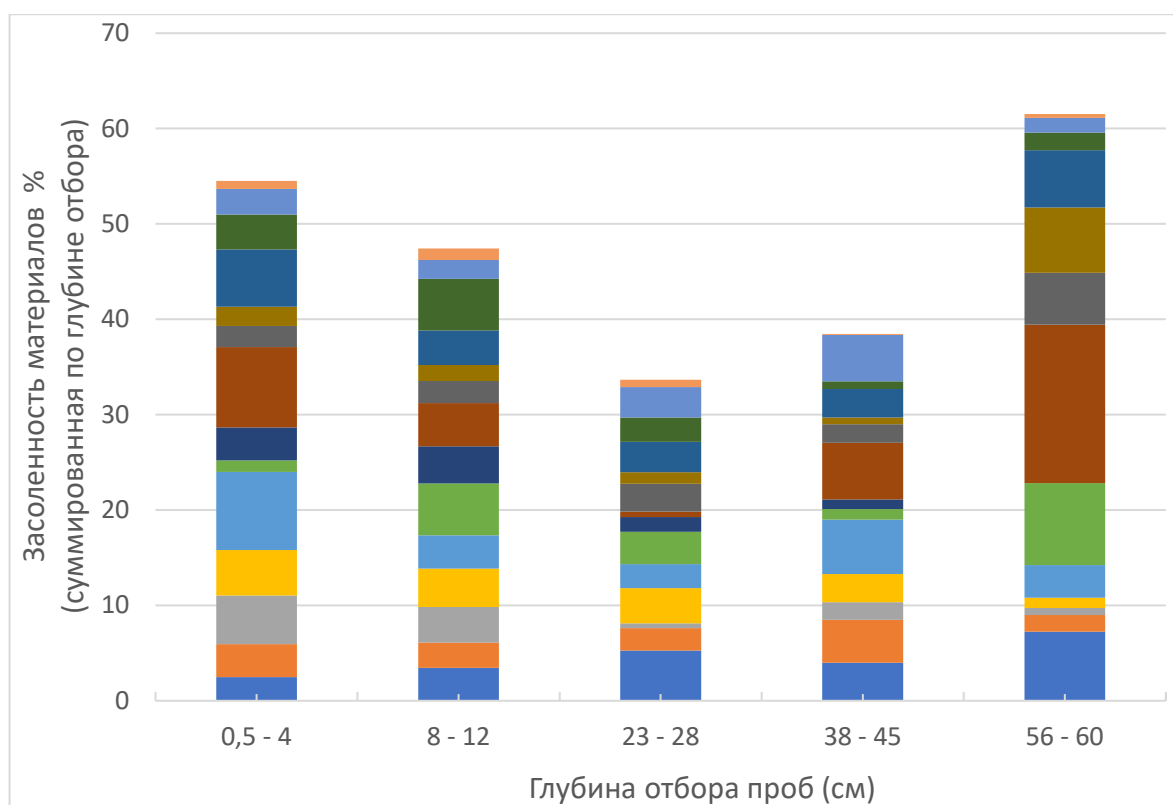


Рисунок 5.34 – Суммарное распределение солей в материалах контрольных сечений церкви Николая Мокрого на высоте 0,1 – 0,2 м от уровня пола

Таблица 5.11 – Распределение солей в материалах контрольных сечений церкви Николая Мокрого на высоте около метра от уровня пола

№ сечения	глубина отбора проб (см)				
	0,5 - 4	8 - 12	23 - 28	38 - 45	56 - 60
№ 2	5,4	4,7	2,0	1,9	1,8
№ 4	5,0	3,0	2,1	9,4	9,6
№ 6	5,4	10,1	9,5	4,1	3,5
№ 13	4,2	4,7	-	5,6	-
№ 14	26,7	6,9	1,0	2,3	2,1
№ 15	4,8	2,6	5,3	5,3	6,6
№ 17	1,5	2,8	1,0	3,7	-
№ 19	2,4	0,5	1,2	-	1,0
№ 20	1,4	0,4	7,3	2,0	5,4

Из таблиц можно видеть, что какая-либо явно выраженная тенденция по возрастанию засоленности материалов в поверхностных слоях на обеих высотах отсутствует. По суммарному распределению можно видеть, что в уровне пола наблюдается обратная тенденция к несколько большей концентрации солей в

наиболее глубокой точке отбора проб. Выше, на метровой отметке, отмечается несколько бóльшая концентрация в поверхностных слоях, что объясняется меньшей доступностью для влаги на этой высоте.

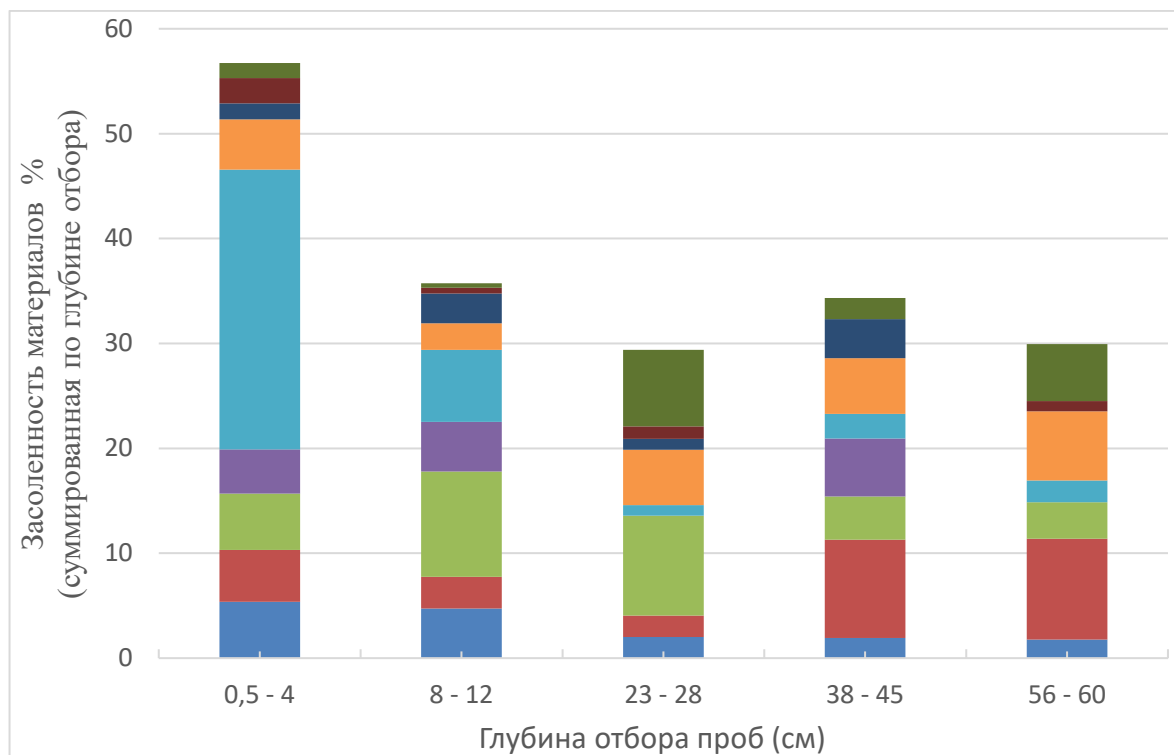


Рисунок 5.35 – Суммарное распределение солей в материалах контрольных сечений церкви Николая Мокрого на высоте около метра от уровня пола

Описанные процессы со временем могут существенно изменить геометрию порового пространства материала. Структура приповерхностных слоев в зонах испарения станет более плотной и с более мелкими порами за счет аккумуляции примесей. Наоборот, поры на тех участках, где произошли разрушения минеральной поверхности, станут более широкими, за счет вымывания микрообломков. Эти поры могут впоследствии развиваться в макротрещины и пустоты [69].

Из сказанного можно видеть, что изменение геометрии пор в процессе деструкции проходит, по меньшей мере, две стадии (Рисунок 5.36).

Стадия 1. Зарождение сети микротрещин. В районе зон локальных напряжений (зон распространения действия механизмов разрушения от

циклического увлажнения) зарождается и развивается сеть микротрещин. На этой стадии на данном конкретном участке наблюдается уменьшение среднего размера пор и увеличение удельной поверхности.

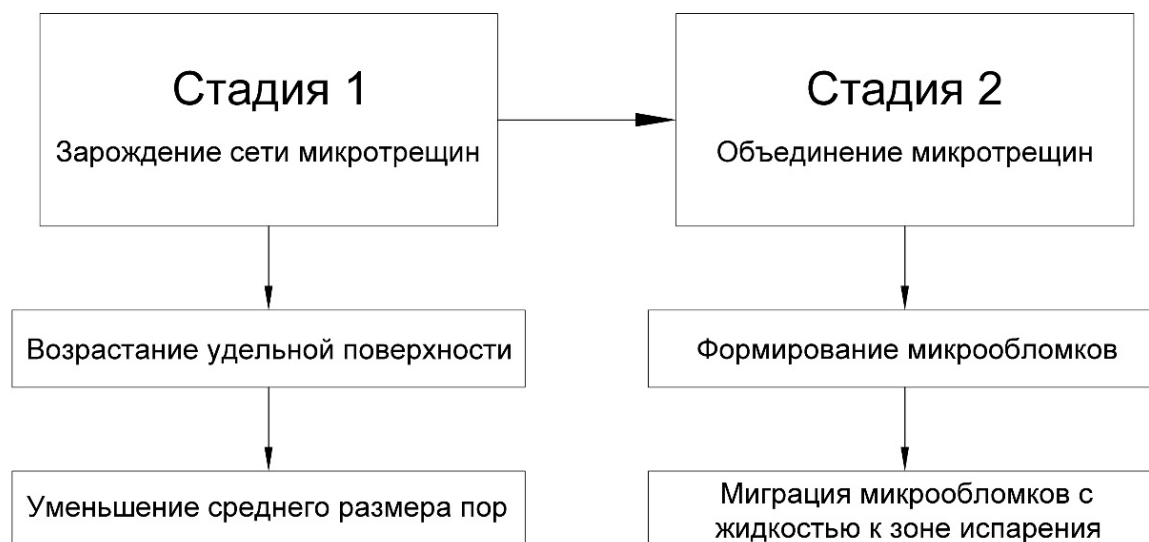


Рисунок 5.36 – Трансформация порового пространства в процессе развития механизмов разрушения

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. Структура участков, где проявлялись напряжения, становится менее плотной с порами увеличенного размера, как результат вымывания части материала в виде микрообломков. На этих участках, по всей вероятности, будет наблюдаться снижение прочностных характеристик. Наоборот, приповерхностный слой материала в районе близлежащей зоны испарения, становится более плотным с развитой микропористостью за счет осаждения примесей в процессе испарения жидкости. При сужении пор до нанометрической области на этих участках также запускаются описанные выше механизмы разрушения и все последующие этапы деструкции.

В случае оценки свойств материалов по микрокернам фиксация второй стадии деструкции возможна, в основном, только косвенно, по формату образцов. При прохождении пробоотборником ослабленных зон, каковыми являются зоны формирования микрообломков, материал будет крошиться. Соответственно, уменьшение размера керна является показателем увеличения количества зон, относящихся ко второй стадии деструкции. Оставшиеся части керна (собственно, образцы пробы), представляют материал, находящийся на более ранней (первой) стадии (стадии распространения сети микротрещин) процесса деструкции.

Рассматриваемый характер процесса деструкции связан с изначальным существованием и дальнейшим развитием зон испарения. Эти микрозоны связаны с пограничными участками на стыке слоев, которые во множестве распределены внутри конструкции. В связи с этим процессы деструкции могут параллельно развиваться во всем объеме конструкции, ограничиваясь лишь участками, недостижимыми для прямого увлажнения [69].

Из сказанного становится очевидным, что в условиях кладочной системы процесс деструкции носит саморазвивающийся характер, решающим фактором в котором служит доступ жидкой среды. С этой точки зрения любой участок кладочной системы, долговременно существующий в условиях постоянного или периодического увлажнения, будет неизбежно (в той или иной степени) зонирован по физическим свойствам материалов. Это зонирование определяется расположением макротрещин и пустот, представляющих собой внутренние зоны испарения. Приповерхностные слои этих внутренних зон испарения, будут уплотнены различными примесями, включающими частицы почвы, микрообломки и соли. Состояние же материалов за зонами уплотнения может существенно различаться. Материалы могут быть:

- в нетронутом состоянии (физические свойства материалов приближаются к изначальным). В этом случае процессы деструкции либо не происходят, либо происходят в замедленном режиме. Доступ влаги от источников увлажнения минимален;

- пронизанными сетью микротрещин (средний размер пор уменьшается, удельная поверхность возрастает по сравнению со свойствами новых материалов, первый этап деструкции). В этом случае процессы деструкции активно развиваются, однако материалы сохраняют свои прочностные характеристики близкими к изначальным;
- пронизанными макротрещинами (потенциальный разлом, второй этап деструкции). В этом случае развитие процессов деструкции привело к возрастанию пустотности, следствием чего может явиться снижение прочностных характеристик материалов.

Это чередование физических свойств является основанием для характеристики состояния материалов каменной кладки исторических конструкций ОКН.

5.6. Взаимосвязь структурно-механических характеристик с физическими свойствами и параметрами влажности

Как было показано проведенными исследованиями, основным направлением деструкции материалов кладочных систем от циклического увлажнения является формирование и развитие микротрещин, влияющее, как на прочностные характеристики, так и на свойства пористой системы. Развитые сети микротрещин влияют на характер получаемых образцов и на их устойчивость в процессе лабораторных исследований. Чем менее качественный образец получен из кладки, и чем менее он устойчив к циклам увлажнения / высыхания, тем ниже его прочность и меньше долговечность. С этой точки зрения можно говорить о том, что структурно-механические характеристики являются косвенным отражением физических свойств пористой системы, поскольку разломы материала в процессе отбора проб возникают на участках с развитой микротрещиноватостью и пустотностью. Для кирпича это подтверждается полученными корреляционными зависимостями между этими двумя направлениями.

Так, средний вес образцов проб кирпича связан сильной прямой зависимостью ($r = 0,77$) со средним размером пор и сильной обратной зависимостью ($r = -0,75$) с количеством пор менее 0,1 мкм (Рисунок 5.37). Кроме того, наблюдается средняя обратная корреляция ($r = -0,54$) с показателями степени микропористости по данным первичной сорбции. Отсюда следует, что размеры образцов кирпича уменьшаются с уменьшением размера пор, а также с возрастанием сорбционных способностей и микропор.

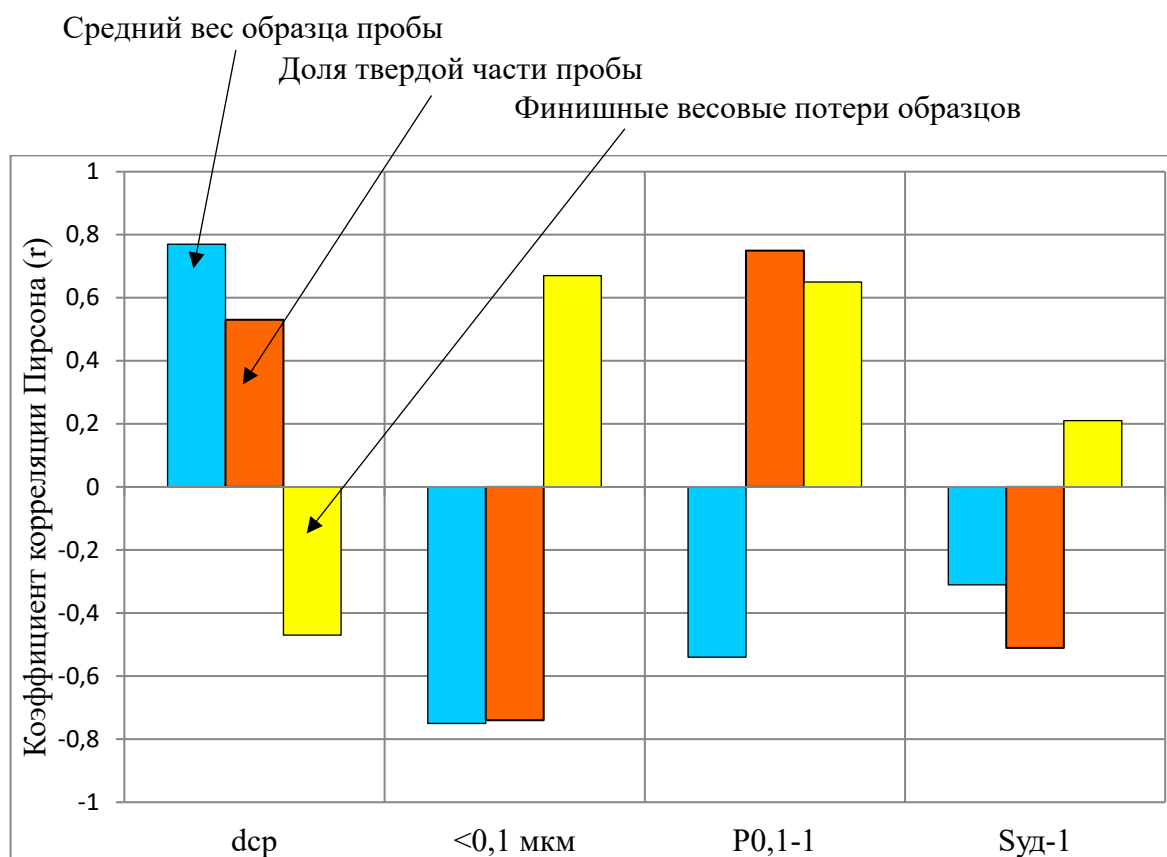


Рисунок 5.37 – Корреляционные зависимости между структурно-механическими характеристиками и физическим свойствами образцов кирпича. dcp – средний размер пор, <0,1 мкм – процент микропор, P_{0,1-1} – степень микропористости по данным первичной сорбции, S_{уд} – площадь удельной поверхности по данным первичной сорбции

Доля твердой части пробы кирпича хорошо коррелирует с количеством пор менее 0,1 мкм ($r = -0,74$) и степенью микропористости неочищенных образцов ($r = -0,75$). Кроме того, наблюдается средняя корреляция со средним размером пор ($r = 0,53$) и удельной поверхностью неочищенных образцов ($r = -0,51$). Доля твердой

части оказывается тем ниже, чем больше микропор и чем выше сорбционные характеристики и удельная поверхность по данным первичной сорбции.

Ну и, наконец, наблюдается значимая корреляция между весовыми потерями образцов кирпича после последнего цикла увлажнения / высыхания и количеством микропор ($r = 0,67$), а также кажущимися показателями степени микропористости ($r = 0,65$). Иными словами, весовые потери образцов тем больше, чем больше количество микропор и чем выше сорбционные характеристики кирпича по данным первичной сорбции.

Полученные корреляции подтверждают зависимость всех трех рассматриваемых направлений структурно-механических характеристик от свойств пористого пространства и, соответственно, от степени развитости микротрещиноватости и пустотности, поскольку уменьшение среднего размера пор, возрастание сорбционных характеристик и удельной поверхности определяется развитостью сетей микротрещин.

Кроме того, следует отметить наличие связей между структурно-механическими и отдельными влажностными характеристиками (Рисунок 5.38). Показатели среднего веса образцов проб кирпича демонстрировали среднюю корреляцию ($r = 0,61$) с количеством контрольных сечений – зондажей, содержащих перепады по влажности между соседними пробами не более 30%, а также слабые корреляции с количеством зондажей, имеющих перепады по влажности между соседними пробами не менее 60% ($r = -0,45$) и с количеством зондажей, содержащих материал в сорбционном состоянии ($r = 0,45$). Аналогичная зависимость от количества контрольных участков, содержащих перепады по влажности между соседними пробами не более 30% наблюдалась также для показателей доли твердой части пробы кирпича, при ее выражении через процент образцов с долей менее 0,5 ($r = -0,51$), и весовых потерь последнего цикла, как кирпича ($r = 0,5$), так и раствора ($r = 0,46$).

Отсюда следует, что средний вес и доля твердой части проб кирпича возрастали, а весовые потери всех материалов снижались, с увеличением

количества контрольных сечений с сухим материалом и без резких скачков влажности.

Полученные корреляционные зависимости с влажностью свидетельствуют о том, что структурно-механические показатели зависят не столько от бóльшей степени увлажнения, сколько от меньшего количества циклов увлажнения, что именно и характеризуют выделенные параметры: количество зондажей с перепадами по влажности между соседними пробами не более 30% (или обратная ситуация с перепадами не менее 60%) и количество зондажей с материалами, находящимися в сорбционном состоянии. Поскольку процесс вывода капиллярной влаги из материалов кладки исторических конструкций является достаточно длительным, нередко исчисляющимся годами, то оба показателя, фактически, выделяют участки реже других подвергающиеся увлажнению.

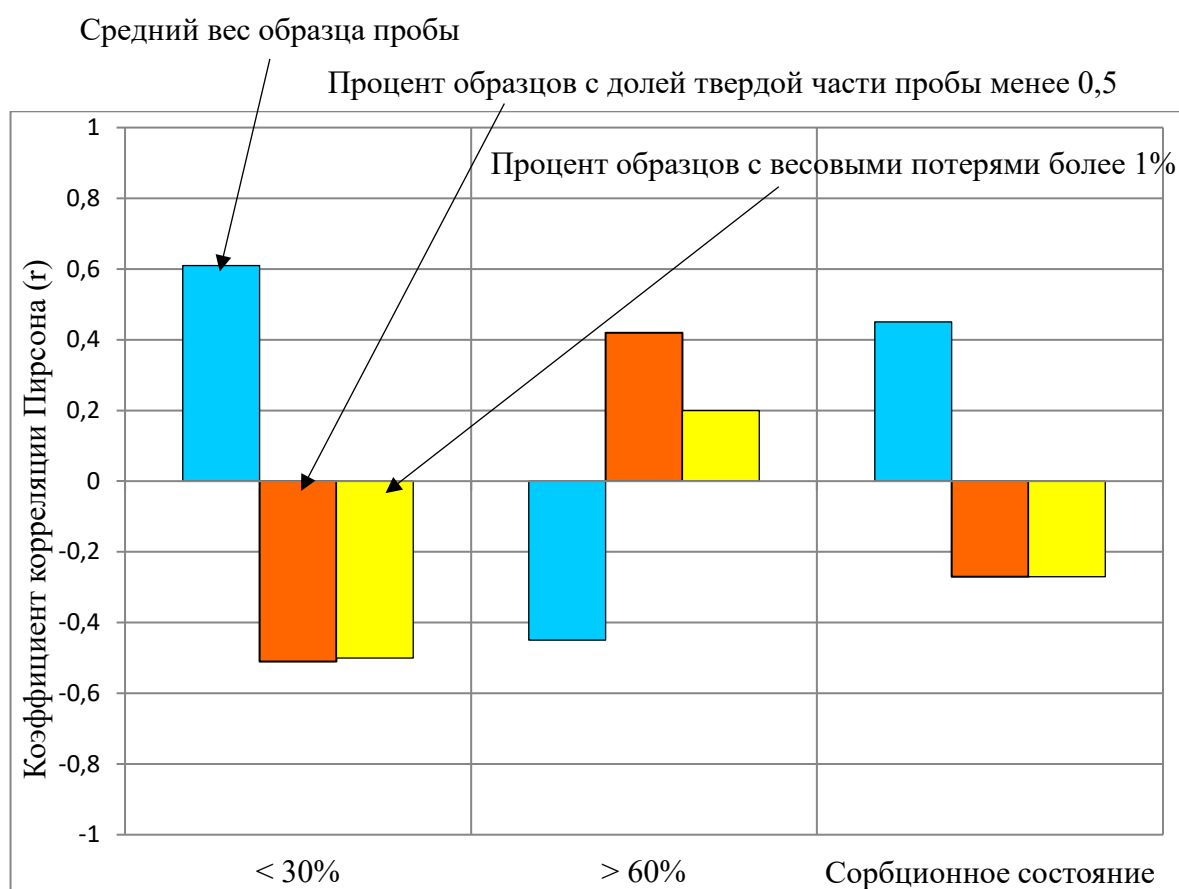


Рисунок 5.38 – Корреляционные зависимости между структурно-механическими характеристиками и влажностными свойствами образцов кирпича. <30% – количество контрольных сечений с перепадами по влажности между соседними пробами не более 30%, >

60% – количество контрольных сечений с перепадами по влажности между соседними пробами не менее 60%, Сорбционное состояние – количество контрольных сечений с материалами в сорбционном состоянии

Таким образом, с одной стороны, рассматриваемые структурно-механические характеристики являются прямым отражением процессов разрушения материалов. С другой стороны, они демонстрируют достаточно очевидную зависимость от физических свойств и параметров влажности, подчеркивающую связь процессов разрушения с изменениями размеров пор и долговременным циклическим увлажнением. Оба фактора позволяют предположить возможность использования структурно-механических характеристик в качестве маркеров состояния степени деструкции материалов.

5.7. Индекс деструкции

Для практического применения мы предлагаем оценивать степень деструкции по критерию – индексу деструкции (I_d), рассчитываемому по формуле:

$$I_d = ((G_a / P_{cm} * 100) * N_m) / I_{wl}, \quad (5.1)$$

где G_a – расчетное значение среднего веса образца пробы,

P_{cm} – расчетный вес керна длиной 1 см,

N_m – доля твердой части материала пробы,

I_{wl} – индекс весовых потерь.

G_a – рассчитывается по следующей формуле:

$$G_a = (G_t + G_{ref}) / 2, \quad (5.2)$$

где G_t – средний вес образца пробы,

G_{ref} – средний вес образца по трем референтным (как правило, наиболее крупным) образцам, использующимся для лабораторных исследований.

P_{cm} – рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{cm} = \frac{\pi d^2}{4} * \rho_b, \quad (5.3)$$

где d – диаметр керна, ρ_b – кажущаяся плотность материала.

N_m – рассчитывается по следующей формуле:

$$N_m = \frac{P_{пр}}{I_{пр} * P_{см}}, \quad (5.4)$$

где $P_{пр}$ – вес сухой пробы,

$I_{пр}$ – диапазон отбора пробы.

Для получения индекса весовых потерь I_{wl} значения финишные весовые потери 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 интерпретации результатов используется 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 были проведены его сопоставления с физико-механическими характеристиками материалов по четырем направлениям: прочность на одноосное сжатие, скорость прохождения ультразвука, морозное разрушение и средний размер пор. Первые три были выполнены на 12 объектах, последний – на 23 объектах.

Результаты сопоставления показали значимую корреляцию индекса деструкции с показателями прочности, как для образцов кирпича, так и для раствора. Для кирпича, за исключением двух объектов, где корреляция практически отсутствовала ($r = 0,25$), корреляция, в среднем, составила около $r = 0,5$ (Рисунок 5.39). Для образцов раствора, также исключая два объекта, где корреляция практически отсутствовала ($r = 0,10–0,28$) корреляция, в среднем,

составила $r = 0,69$. При этом на четырех объектах корреляция достигла $r = 0,8–0,9$ (Рисунок 5.40).

Результаты сопоставления с ультразвуковым исследованием показала, что для образцов кирпича корреляция со скоростью волны практически отсутствовала. Только на 4 объектах она составила, в среднем, $r = 0,44$, на остальных она не превышала $r = 0,2–0,3$ (Рисунок 5.39). Для раствора, наоборот, наблюдалась достаточно хорошая корреляция. Исключая один объект, на котором корреляция отсутствовала ($r = 0,21$), средние показатели по остальным объектам составили $r = 0,64$. При этом на трех объектах она превышала $r > 0,8$ (Рисунок 5.40).

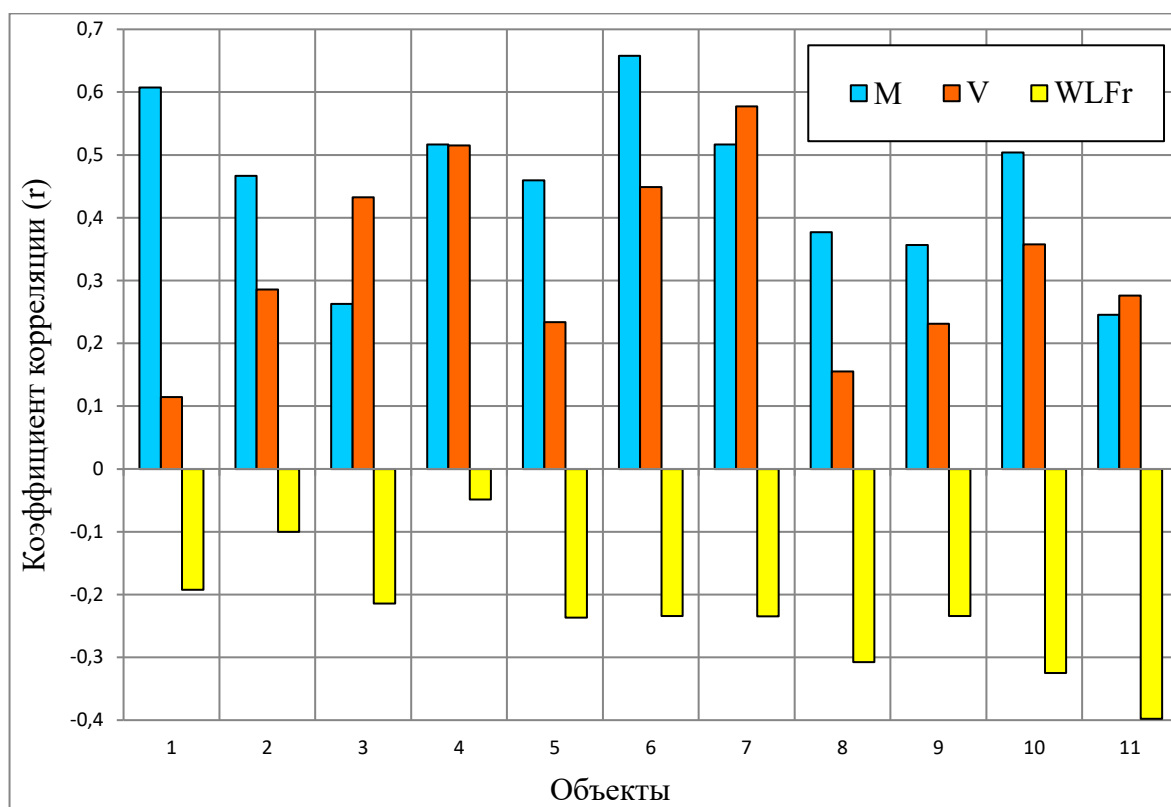


Рисунок 5.39 – Корреляция индекса деструкции I_d с прочностью на сжатие (M), скоростью ультразвука (V), морозостойкостью (WL_{fr}) образцов кирпича. Спасская церковь в Киово в Лобне (1), Духовная академия в СПб здания: 7А (2), 7Б (3), 7Г (4), 11 (5), 15 (6), 17А (7), 17Б (8), 17Г (9), 17М (10), 17Х (11)

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 [203]. Кроме того, реакция

на замораживания воды в пористой системе материалов зависит от размеров образцов. Сочетания факторов микроразмеров, с невозможностью соблюдения единого типоразмера, может влиять на полученные результаты. Данное направление требует дополнительных исследований.

Сопоставление с данными по распределению среднего размера пор показало достаточно хорошую корреляцию для образцов кирпича. Исключая два объекта, где корреляция отсутствовала ($r = 0,01-0,25$) средние значения корреляции составили $r = 0,64$, при том, что на восьми объектах они превысили $r = 0,7$. Для образцов раствора явная корреляция с размером пор отсутствовала. Только для 10 объектов значения корреляции, в среднем, составили $r = 0,58$, для остальных объектов r не превышало $0,1-0,3$ (Рисунок 5.41).

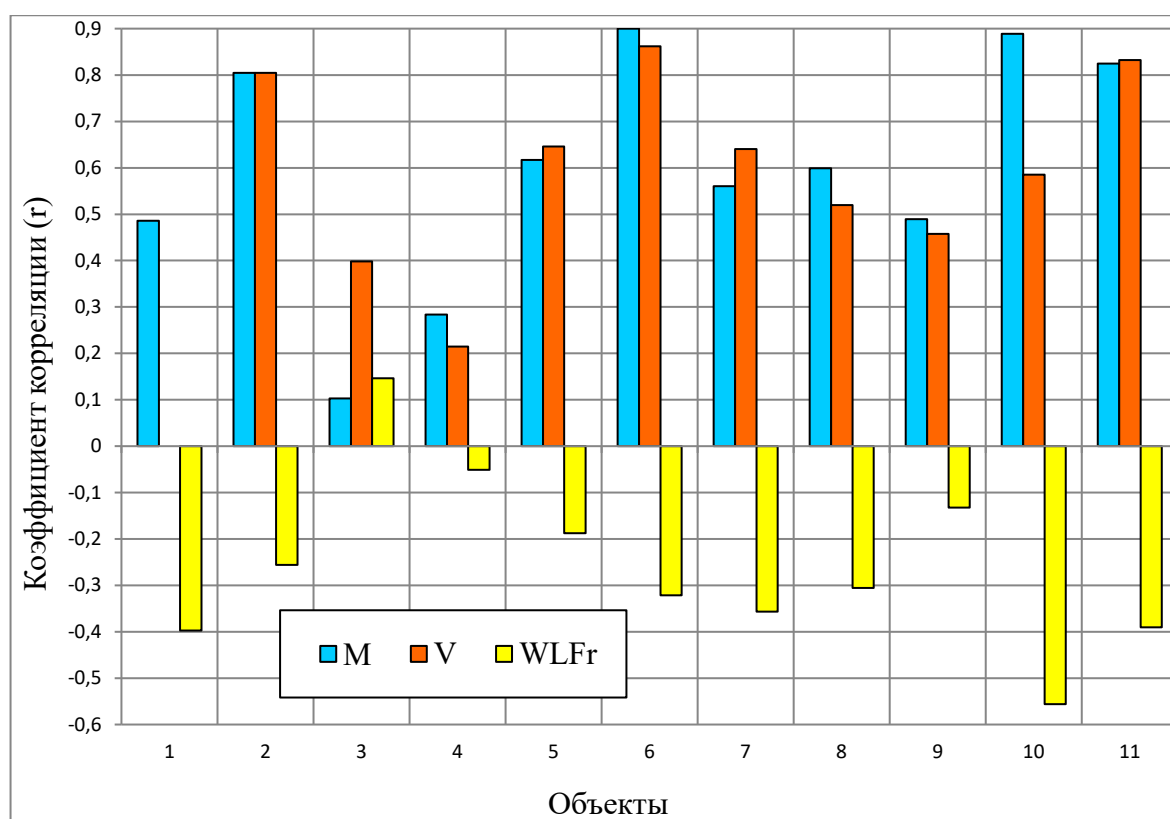


Рисунок 5.40 – Корреляция индекса деструкции I_d с прочностью на сжатие (M), скоростью ультразвука (V), морозостойкостью (WL_{fr}) образцов раствора. Спасская церковь в Киово в Лобне (1), Духовная академия в СПб здания: 7А (2), 7Б (3), 7Г (4), 11 (5), 15 (6), 17А (7), 17Б (8), 17Г (9), 17М (10), 17Х (11)

Результаты сравнения показывают, что предложенная методика оценки степени деструкции значимо коррелирует с несколькими независимыми группами данных, объединяя тем самым, разные направления. Отсутствие корреляции с показателями морозного разрушения требует дополнительных исследований.

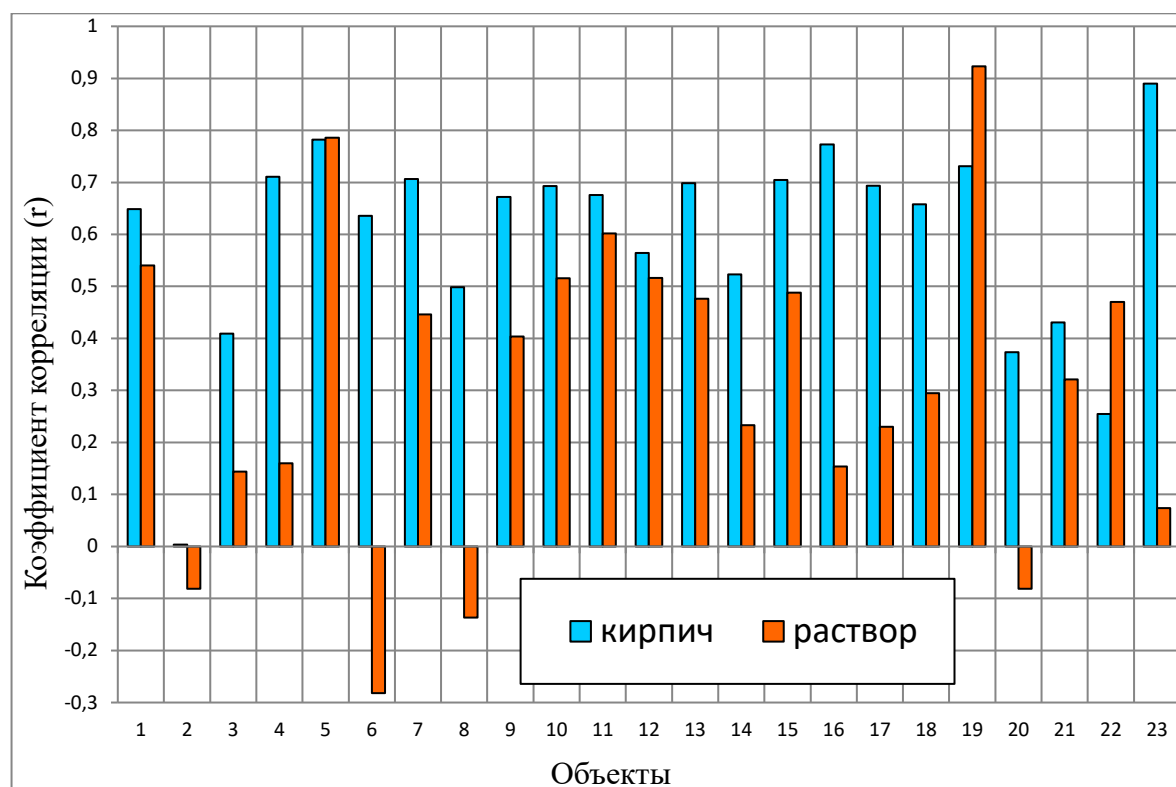


Рисунок 5.41 – Корреляция индекса деструкции I_d со значениями среднего размера пор.

Церковь Богоявления Рязанского Кремля (1), Георгиевский собор в Касимове (2), Успенский собор Княгинина монастыря (3), Троице-Знаменская церковь в Лежнево (4), Спасская церковь в Киово в Лобне (5), Усадьба Лопухиных в Москве (6), Мечеть на Большой Татарской в Москве, главное (7) и административное (8) здания, церковь Николая Мокрого в Ярославле (9), Духовная академия в СПб здания: 7А (10), 7Б (11), 7Г (12), 11 (13), 15 (14), 17А (15), 17Б (16), 17Г (17), 17М (18), 17Х (19), Успенский собор в Смоленске (20), Смоленский собор Новодевичьего монастыря в Москве (21), Судная палата Архангельского собора Московского Кремля (22), Троицкий собор в Яхrome (23)

5.8. Выводы по 5 главе

- Выявленное отсутствие взаимосвязи между влажностными режимами соседних участков контрольных горизонтальных сечений – зондажей

позволил предположить существование тенденции к локальному блокированию миграции жидкости в материалах кладки. Данные тенденции могут указывать на процессы зарождения и развития сетей микротрещин и пустотности в исторических конструкциях объектов культурного наследия.

- Анализ изменения влажностных характеристик параллельно с изменениями параметров размера пор в контрольных сечениях – зондажах позволил выявить нарушение физических закономерностей в отношении перераспределении жидкости в материалах. Отсюда был сделан вывод, что характер распределения влажности в исторических конструкциях, в первую очередь, определяется не свойствами самих материалов, а развитой пустотностью между ними
- Выявлены тенденции, связанные с изменением свойств пористой структуры исследуемых материалов, в частности, снижение среднего размера пор, а также увеличение удельной поверхности и сорбционных характеристик;
- Проведено сопоставление физических свойств исследуемых материалов исторических конструкций с материалами по данным литературных источников;
- Показан механизм деструкции материалов кладочных систем в условиях долговременного циклического воздействия влаги.
- Выявлена зависимость структурно-механических характеристик от физических свойств и влажностных параметров исследуемых материалов;
- Предложена методика косвенной оценки состояния материалов каменной кладки конструкций объектов культурного наследия на основе 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 кладочных систем 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 внесены 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 микрокернов материалов памятников ОКН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абдрахимов, В. З. Взаимосвязь фазового и химического составов с долговечностью керамического материала возрастом более 170 лет (Рождественская церковь, Самарская область) / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Новые огнеупоры. – 2021. – № 3. – С. 59-63.
- [2] Абдрахимов, В. З. Взаимосвязь долговечности с фазовым составом и структурой пористости керамических материалов возрастом более ста лет / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, И. Ю. Рощупкина // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – № 20. – С. 2886-2890.
- [3] Абдрахимов, В. З. Физико-химические исследования керамического кирпича Ипатьевского монастыря / В. З. Абдрахимов, В. А. Куликов, И. В. Ковков // Башкирский химический журнал. – 2009. – № 4 (16). – С. 149-152.
- [4] Абдрахимова, Е. С. Взаимосвязь фазового и химического составов с долговечностью керамического материала крепостной стены города Салоники (Греция) возрастом более 1000 лет / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. – 2020. – № 9. – С. 56-59.
- [5] Аринушкина, Е. В. Методика определения водорастворимых веществ / Е. В. Аринушкина, Ф. Б. Аракелян // Сообщения ВЦНИЛКР. – Москва, 1969. – Вып. 24-25, – С. 85-102.
- [6] Белавенец, М. И. Глиноведение. Кирпичное производство. Петербургский способ формования сырца для строительного кирпича / М. И. Белавенец. – Санкт-Петербург : Глиноведение, 1905. – 47 с.
- [7] Белов, В. В. Экспертиза и технология усиления каменной кладки / В. В. Белов, В. Н. Деркач // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7. – С. 14-20.
- [8] Гагарин, В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий : специальности 15.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения», 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гагарин В. Г. ; Научно-исследовательский институт строительной физики. – Москва, 2000. – 396 с. – Библиогр.: с. 286-323.
- [9] Гальперина, М. К. Взаимосвязь пористой пористо-капиллярной структуры и морозостойкости фасадных керамических плиток / М. К. Гальперина, В. М. Егеров // Труды НИИ стройкерамики. – 1985. – № 55. – С. 5-15.

- [10] Гальперина, М. К. Кинетика изменения структуры пористости в процессе обжига глин различного минералогического состава / М. К. Гальперина, А.В. Ерохина // Труды НИИ стройкерамики. – 1981. – № 45. – С. 3-18.
- [11] ГОСТ 473.4-81. Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кажущейся плотности и кажущейся пористости : межгосударственный стандарт : принят и утвержден постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 22 июня 1981 г. № 3036 : дата введения 1982-07-01 / Министерство химического и нефтяного машиностроения. – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
- [12] ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : межгосударственный стандарт : принят и утвержден межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 22 июля 2015 г. N 78-П : дата введения 2016-04-01 / Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве // Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2002. – 31 с.
- [13] ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний : межгосударственный стандарт : принят и утвержден постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 11 декабря 1985 г. N 214 : дата введения 1986-07-01 / Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК им. Кучеренко) Госстроя СССР. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 17 с.
- [14] ГОСТ 7025-91. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости : межгосударственный стандарт : принят и утвержден постановлением Государственного строительного комитета СССР от 12 февраля 1991 г. N 5 : дата введения 1991-07-01 / Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 10 с.
- [15] ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе : межгосударственный стандарт : принят и утвержден постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 18 января 1985 г. N 11 : дата введения 1985-07-01 / Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК им. Кучеренко) Госстроя СССР. – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 6 с.
- [16] ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : межгосударственный стандарт : принят и утвержден межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (приложение Д к протоколу от 4 июня 2012 г. N 40) : дата

- введения 2013-07-01 / Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ). – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 31 с.
- [17] ГОСТ 12730.2-2020. Бетоны. Метод определения влажности : межгосударственный стандарт : принят и утвержден межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2020 г. N 135-П) : дата введения 2021-09-01 / Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ). – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 8 с.
- [18] ГОСТ 24332-88. Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии : межгосударственный стандарт : принят и утвержден постановлением Государственного строительного комитета СССР от 15 августа 1988 N 162 : дата введения 1989-07-01 / Министерство промышленности строительных материалов СССР. – Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 17 с.
- [19] ГОСТ 24816-2014. Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности : межгосударственный стандарт : принят и утвержден межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 сентября 2014 г. N 70-П) : дата введения 2015-07-01 / Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 4 с.
- [20] ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций : межгосударственный стандарт : принят и утвержден Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 февраля 2019 г. N 116-П) : дата введения 2019-09-01 / Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ). – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
- [21] ГОСТ 33028-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение влажности : межгосударственный стандарт : принят и утвержден межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 5 декабря 2014 г. N 46) : дата введения 2016-06-01 / Общество с ограниченной ответственностью "Инновационный Технический Центр", Межгосударственный технический комитет по стандартизации МТК 418 "Дорожное хозяйство". – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 4 с.
- [22] ГОСТ Р 57349-2016/EN 772-1:2011. Кирпич и блоки. Метод определения прочности на сжатие : национальный стандарт Российской Федерации : принят и утвержден Приказом

- Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2016 г. N 2019-ст : дата введения 2017-07-01 / ВНИИСТРОМ "Научный центр керамики". – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 12 с.
- [23] Гроздов, В. Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. – Санкт-Петербург : Издательский дом KN+, 2000. – 140 с.
- [24] Деркач, В. Н. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений / В. Н. Деркач, Н. М. Жерносек // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 3 (28). – С. 135-142.
- [25] Де-Рошефор, Н. И. Иллюстрированное урочное положение. Пособие при составлении и проверке смет, проектировании и исполнении работ / Н. И. Де-Рошефор. – Петроград : Склад издания у К. Л. Риккера, 1916. – 694 с.
- [26] Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – Москва : Наука, 1985. – 398 с.
- [27] Ерофеев, В. Т. Контроль химической деструкции материала стеновой керамики с учетом параметров эксплуатации конструкции / В. Т. Ерофеев, Д. Ю. Желдаков, В. В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 3. – С. 145–154. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-3-145-154>
- [28] Желдаков, Д. Ю. Определение долговечности строительной керамики / Д. Ю. Желдаков, В. Т. Ерофеев // Вестник МГСУ. – 2024. – № 3 (19). – С. 394–402. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.3.394-402>
- [29] Желдаков, Д. Ю. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий / Д. Ю. Желдаков, О. И. Пономарев, А. А. Минасян // Вестник НИЦ «Строительство». – 2023. – № 1 (36). – С. 27–40. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-27-40](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40)
- [30] Желдаков, Д. Ю. Химическая коррозия кирпичной кладки. Постановка задачи / Д. Ю. Желдаков // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 29–32. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-29-32>
- [31] Желдаков, Д. Ю. Химическая коррозия кирпичной кладки. Протекание процесса / Д. Ю. Желдаков // Строительные материалы. – 2019. – № 4. – С. 36–43. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-36-43>

- [32] 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). – С. 64-71.
- [33] Инчик, В. В. Технология изготовления кирпича в Санкт-Петербургской губернии в XVIII веке / В. В. Инчик // Строительные материалы и изделия. – 2004. – № 2 (590). – С. 52-55.
- [34] Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 1 (42). – С. 24-31.
- [35] Ищук, М. К. Вертикальные температурные швы в стенах с лицевым слоем из каменной кладки / М. К. Ищук // Жилищное строительство. – 2018. – № 9. – С. 54-59.
- [36] Ищук, М. К. Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии (к вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям) / М. К. Ищук // Строительные материалы. – 2020. – № 7. – С. 67-75.
- [37] Ищук, М. К. Прочность и трещиностойкость каменной кладки наружных многослойных стен : специальность 15.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ищук М. К. ; Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко. – Москва, 2019. – 295 с. – Библиогр.: с. 271-295.
- [38] Ищук, М. К. Экспериментальные исследования НДС кирпичной кладки лицевого слоя наружных стен с гибкими связями на температурно-влажностные воздействия / М. К. Ищук // Вестник НИЦ «Строительство». – 2018. – № 3 (18). – С. 61-78.
- [39] Ищук, М. К. Численные исследования прочности и деформаций наружных стен с лицевым слоем из каменной кладки с гибкими связями при температурных воздействиях / М. К. Ищук, В. Л. Ищук // Вестник НИЦ «Строительство». – 2019. – № 2 (21). – С. 60-73.
- [40] Ищук, М. К. Механизм образования трещин в кладке лицевого слоя наружных стен при температурных воздействиях / М. К. Ищук, В. Л. Ищук, Г. И. Шапиро // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 2. – С. 14-27.
- [41] Ищук, М. К. Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении / М. К. Ищук, Е. М. Ищук // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 8. – С. 31-42.
- [42] Капустин, С. А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов с периодически повторяющейся структурой : монография / С. А. Капустин, С. Ю. Лихачева. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2012. – 96 с.
- [43] Карнаухов, А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов / А. П. Карнаухов. – Новосибирск : Наука. Сиб. Представительство РАН, 1999. – 470 с.

- [44] Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко, И. В. Красильников // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 2 (37), – С. 65-70.
- [45] О долговечности каменной кладки / А. М. Крыгина, П. В. Мальцев, Н. В. Картамышев, А. Г. Ильинов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 185-187
- [46] Орлович, Р. Б. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий / Р. Б. Орлович, В. Н. Деркач // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7. – С. 3-10.
- [47] Прокофьев, М.А. Описание глино-соломенных крыш и способов выделки кровельной черепицы и кирпичей / М.А. Прокофьев // Общеизвестные издания Новгородского Губернского Земства. – 1898. – № 8 (36). – С. 1-27.
- [48] Ржанов, И. О кирпиче и Московских кирпичных заводах / И. Ржанов. – Москва : Типография Бахметева, 1861. – 30 с.
- [49] Румянцева, В. Е. Научные основы закономерностей массопереноса в процессах жидкостной коррозии строительных материалов : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (строительство)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Румянцева В. Е. ; Ивановский государственный архитектурно-строительный университет. – Иваново, 2011. – 327 с. – Библиогр.: с. 273-311.
- [50] Сизов, Б. Т. Сохранение памятников из камня на открытом воздухе: скульптура, архитектур, декор : специальность 24.00.03 «Музееведение, консервация и реставрация историко-культурных объектов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сизов Б. Т. ; Государственный научно-исследовательский институт реставрации. – Москва, 1998. – 132 с. – Библиогр.: с. 118-125.
- [51] Сизов, Б. Т. Теплофизические аспекты сохранения памятников архитектуры / Б. Т. Сизов // АВОК. – 2002. – № 1. – С. 24-31.
- [52] Сизов, Б. Т. Мониторинг температурно-влажностного режима памятников архитектуры / Б. Т. Сизов // АВОК. – 2003. – № 2. – С. 44-49.
- [53] Сизов, Б. Т. Храм Василия Блаженного. Изучение температурно-влажностного режима / Б. Т. Сизов // АВОК. – 2004. – № 3. – С. 28-38.
- [54] Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков, О. Ю. Сударь, Е. А. Лаптев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 3 (18). – С. 9-24.

- [55] Столпянский, П. Из прошлого Петрограда. К истории строительных материалов / П. Столпянский // Зодчий. – 1915. – № 30. – С. 295-304.
- [56] Терещенко, А. Г. Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами солей. Достоверность данных / А. Г. Терещенко. – Томск : Томский политехнический университет, 2010. – 22 с.
- [57] Улыбин, А. В. Результаты обследования жилого корпуса в составе «Комплекса зданий Студенческого городка политехнического университета» / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – № 5. – С. 6-16.
- [58] Улыбин, А. В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №3, С. 29-34.
- [59] Улыбин, А. В. Контроль влажности при обследовании каменных конструкций / А. В. Улыбин, С. А. Старцев, С. В. Зубков // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 7 (42). – С. 32-39.
- [60] Урочные положения на все вообще работы, производящиеся при крепостях, гражданских зданиях и гидротехнических сооружениях. – Санкт-Петербург : Типография департамента военных поселений, – 1839. – 413 с.
- [61] Федосов, С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С. В. Федосов. – Иваново : ИПК «ПресСто», 2010. – 364 с.
- [62] Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – Москва : Стройиздат, 1973. – 287 с.
- [63] Чернышов, Е. М. Развитие методов прогнозирования долговечности строительных конструкций на основе разработки теории и моделей коррозии бетонов с учетом явлений тепломассопереноса и формирования градиентных состояний / Е. М. Чернышов, С. В. Федосов, В. Е. Румянцева // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 1. – С. 89-100.
- [64] Шаманов, В. А. Причины отслоения наружного слоя лицевого кирпича / В. А. Шаманов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_13_paliy_suleimanov.pdf_3c8da314d3.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
- [65] 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.

- [66] 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)
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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)
- [70] 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
- [71] Abdelouahab, N. B. Controlled imbibition in a porous medium from a soft wet material (poultice) / N. B. Abdelouahab, A. Gossard, C. Marlie`re // Soft Matter. – 2019. – № 15 (33). – P. 6732-6741. <https://doi.org/10.1039/C9SM01345H>
- [72] Abdolhosseini Qomi, M. J. Advances in atomistic modeling and understanding of drying shrinkage in cementitious materials / M. J. Abdolhosseini Qomi, L. B. Tulio Honorio, I. Maruyama // Cement and Concrete Research. – 2021. – № 148. – P. 2-33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106536>
- [73] Adamovic, J. V. Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic / J. Adamovic, R. Mikuláš, J. Schweigstillová, V. Böhmová // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2011. – Vol. 8, № 1 (161). – P. 29-46.
- [74] Agliata, R. Moisture measurements in heritage masonries: a review of current methods / R. Agliata, L. Mollo, R. Greco // Materials Evaluation. – 2018. – № 11 (76). – P. 1468-1477.
- [75] Agyekum, K. Diagnosing Damp in a Tropical Building. Applying Theory to Practice / K. Agyekum, J. Ayarkwa, B. Salgin // International Journal of Architecture, Engineering and Construction. – 2017. – Vol. 6, № 3. – P. 44-50. <https://doi.org/10.7492/IJAEC.2017.016>

- [76] Ahmad, A. Stone properties and damage induced by salt crystallisation in some Jordanian Stones / A. Ahmad, S. Stefan Simon, B. Middendorf // Proceedings of the 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. – New York : Columbia University, 2012. – P. 1-11.
- [77] Aït Oumeziane, Y. Hygrothermal properties of an early 20th century clay brick from eastern France: Experimental characterization and numerical modelling / Y. Aït Oumeziane, A. Pierre, F. El Mankibi // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 273. – P. 1-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121763>
- [78] Aldabibi, M. Improving Frost Durability Prediction based on Relationship between Pore Structure and Water Absorption / M. Aldabibi, M. Nokken, H. Ge // Proceedings of the XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. DBMC 2020. – Barcelona : C. Serrat, J.R. Casas and V. Gibert (Eds), 2020. – P. 1-8. <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.222>
- [79] Anovitz, L. M. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures / L. M. Anovitz, R. David, D. R. Cole // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2015. – № 1 (80). – P. 61-164. <https://doi.org/10.2138/rmg.2015.80.04>
- [80] Ashurst, N. Understanding dampness in historic buildings / N. Ashurst // Structural Survey. – 1990. – № 3 (8). – P. 268-277. <https://doi.org/10.1108/EUM00000000003223>
- [81] ASTM C42/C42M – 04. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete : highway and Transportation Officials Standard AASHTO № T24 / American Association State. – 2009. – 6 p.
- [82] Atikoğlu, M. C. Materials properties of contemporary solid bricks and their assessment in reference to the historic bricks : A thesis submitted to the graduate school of natural and applied Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Building Science in Architecture / Atikoğlu M. C. ; Middle East Technical University. – 2019. – 147 p.
- [83] Bajare, D. Restoration of the historical brick masonry / D. Bajare, V. Svinka, // Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. – Amsterdam : Elsevier Science, 2011. – P. 3-11.
- [84] Balen, K. Van. Expert system for the evaluation of the deterioration of ancient brick structures. Scientific background of the damage atlas and the masonry damage diagnostic system / K. Van Balen, J. Mateus, L. Binda, G. Baronio // Project No EV5V-CT92-0108. – Research report No 8 (Vol. 1). – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 1999. – 232 p. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05215-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05215-1)
- [85] Barone, G. Microtextural and microstructural influence on the changes of physical and mechanical properties related to salts crystallization weathering in natural building stones / G. Barone, P. Mazzoleni, G. Pappalardo // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 95. – P. 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.131>

- [86] Barsotti, E. In situ investigation of fluid-rock interactions at Ångström resolution / E. Barsotti, Z. Qin, M. Piri // *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*. – 2021. – № 2 (126). – P. 1-17. <https://doi.org/10.1029/2020jb021043>
- [87] Beck, K. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité : Thèse pour obtenir le grade de docteur / Beck K. ; Université d'Orléans. – 2006. – 228 p.
- [88] Bellanger, M. Influence des propriétés du milieu poreux sur la durabilité au gel des roches calcaires / M. Bellanger, J. M. Remy, F. Homand // *Can. Geotech.* – 1996. – № 33. – P. 333-349. <https://doi.org/10.1139/t96-011>
- [89] Benavente, D. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength / D. Benavente, M. A. García del Cura, R. Fort // *Engineering Geology*. – 2004. – № 74. – P. 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.005>
- [90] Benavente, D. Influence of microstructure on the resistance to salt crystallization damage in brick / D. Benavente, L. Linares-Fernandez, G. Cultrone // *Material and structure*. – 2006. – № 39. – P. 105-113. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9037-0>
- [91] Benavente, D. The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks / D. Benavente, N. Cueto, J. Martinez-Martinez // *Environ Geol.* – 2007. – № 52. – P. 215-224. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0475-y>
- [92] Benavente, D. Why pore size is important in the deterioration of porous stones used in the build heritage / D. Benavente // *Macla*. – 2011. – № 15. – P. 41-42.
- [93] Benavente, D. The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones / D. Benavente, G. Cultrone, M. Gomez-Heras // *Eur. J. Mineral.* – 2008. – № 20. – P. 673-685. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1850>
- [94] Benavente, D. Influence of water transport and pore structure on the durability of porous building stones / D. Benavente, J. Martinez-Martinez, G. Algozzini // *Proceedings of IAEG Conference*. – London : The Geological Society of London, 2006. – P. 1-8.
- [95] Bhattarai, J. Study on the Physical and Mechanical Properties of Ancient Clay Brick Samples of Kathmandu Valley, Nepal / J. Bhattarai, D. B. Ghale, Y. P. Chapagain // *Tribhuvan University Journal*. – 2018. – № 2 (32). – P. 1-18. <https://doi.org/10.3126/tuj.v32i2.24699>
- [96] Binda, L. Learning from Failure. Long-term behaviour of heavy masonry structures. Vol. 23 of *Advances in Architecture*, WIT Press, Southampton, 2008.
- [97] Binda, L. State of the Art of Research on Historic Structures in Italy / L. Binda, A. Saisi. – Milan : Advanced Research Centre for Cultural Heritage Interdisciplinary Projects. – 2002. – 51 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/237440027_State_of_the_Art_of_Research_on_Historic_Structures_in_Italy (дата обращения 02.09.2024).

- [98] Binda, L. State Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries / L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi // *Construction and Building Materials*. – 2000. – № 4 (14). – p. 199-233. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0)
- [99] Binda, L. Determination of Moisture Content in Masonry Materials: Calibration of Some Direct Methods / L. Binda, T. Squarcina, R. Van Hees // *Proceedings of the 8th international congress on deterioration and conservation of stone : Volume 1*. – Berlin : Josef Riederer, 1996. – P. 423-435.
- [100] Bison, P. Limits and Advantages of Different Techniques for Testing Moisture Content in Masonry / P. Bison, G. Cadelano, L. Capineri // *Materials Evaluation*. – 2011. – № 1 (69). – P. 111-116.
- [101] Blaine, R. L. Use of Internal Surface Area Measurements in Research on Freezing and Thawing of Materials / R. L. Blaine, C. M. Hunt, L. A. Tomes // *Proceedings of the Highway Research Board 32*. – Washington : Highway Research Board. – 1953. – P. 298-306.
- [102] Bocca, P. The use of microcores in structural assessment / P. Bocca // *Proceedings of IABSE 13th Congress*. – Helsinki : International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). – 1988. – P. 379-384.
- [103] Borges, C. Durability of ancient lime mortars in humid environment / C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga // *Construction and Building Materials*. – 2014. – № 66. – P. 606-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.019>
- [104] Bosiljkov, V. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures / V. Bosiljkov, M. Uranjek, R. Žarnić // *Journal of Cultural Heritage*. – 2010. – № 3 (11). – P. 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.007>
- [105] Botas, S. Adherence evaluation in tile – mortar interface / S. Botas, M. R. Veiga, A. Velosa, // *Materials Science Forum : Vols 730-732*. – Trans Tech Publications Ltd. – 2012. – P. 403-408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.403>
- [106] Bourgès, A. Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment : *Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften* / Bourgès, A. ; Ludwigs-Maximilians-Universität. – München, 2006. – 201 p.
- [107] Bracka, A. Comparison of pore characteristics and water absorption in ceramic materials with frost resistance factor, F_c / A. Bracka, Z. Rusin // *Structure and Environment*. – 2012. – № 3 (4). – P. 15-19.
- [108] Brocken, H. J. P. Moisture transfer in brick masonry: the grey area between bricks : *ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische* / Brocken H. J. P. ; Eindhoven University of Technology. – The Netherlands, 1998. – 151 p.

- [109] Brocken, H. J. P. Water extraction out of mortar during brick laying: a NMR study / H. J. P. Brocken, M. E. Spiekman, L. Pel // *Materials and Structures*. – 1998. – № 31. – P. 49-57. <https://doi.org/10.1007/BF02486414>
- [110] Brocken, H. J. P. Composition of lime-cement and air-entrained cement mortar as a function of distance to the brick-mortar interface: consequences for masonry study / H. J. P. Brocken, N. M. van der Pers, J. A. Larbi // *Materials and Structures*. – 2000. – № 33. – P. 634-646. <https://doi.org/10.1007/BF02480603>
- [111] Brocken, H. J. P. Moisture transport over the brick-mortar interface / H. J. P. Brocken, L. Pel // *International Symposium on Moisture Problems in Building Walls*. – Porto. – 1995. – P. 415-124.
- [112] Brocken, H. J. P. Moisture transport over the brick-mortar interface – water absorption and drying / H. J. P. Brocken, L. Pel // *11th International Block/Brick Masonry Conference*. – Shanghai : China Association for Engineering Construction Standardization, 1997. – P. 826 – 835.
- [113] Bromblet, Ph. Evaluation of the durability and compatibility of traditional repair lime-based mortars on three limestones / Ph. Bromblet // *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*. – 2000. – № 5 (6). – P. 513-528.
- [114] BS 1881: Part 120 «Method for determination of the compressive strength of concrete cores» : British Standard / British Standard Institution. – London. – 1983. – 5 p.
- [115] Buj, O. Influence of pore morphology on the durability of sedimentary building stones from Aragon (Spain) subjected to standard salt decay tests / O. Buj, J. Gisbert // *Earth Environment Science*. – 2010. – № 61. – P. 1327-1336. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0451-4>
- [116] Cabeza-Prieto, A. Comparative Analysis of the Thermal Conductivity of Handmade and Mechanical Bricks Used in the Cultural Heritage / A. Cabeza-Prieto, M.S. Camino-Olea, M.P. Sáez-Pérez // *Materials*. – 2022. – № 15. – P. 4001-4016. <https://doi.org/10.3390/ma15114001>
- [117] Calle, K. Liquid moisture transport in combined ceramic brick and natural hydraulic lime mortar samples: Does the hygric interface resistance dominate the moisture transport? / K. Calle, T. De Kock, V. Cnudde // *Journal of Building Physics*. – 2019. – № 3 (43). – P. 208-228. <https://doi.org/10.1177/1744259119857762>
- [118] Camuffo, D. Physical weathering of stones / D. Camuffo // *Science of The Total Environment*. – 1995. – № 1-3 (167). – P. 1-14. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04565-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04565-1)
- [119] Camuffo, D. Standardization activity in the evaluation of moisture content / D. Camuffo // *Journal of Cultural Heritage*. – 2018. – № 31. – P. S10-S14. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.021>
- [120] Capitani, D. An integrated study for mapping the moisture distribution in an ancient damaged wall painting / D. Capitani, N. Proietti, M. Gobbino // *Anal Bioanal Chem*. – 2009. – 395. – P. 2245-2253. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3170-5>

- [121] Carasek, H. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles / H. Carasek, P. Japiassú, O. Cascudo // *Construction and Building Materials*. – 2014. – № 59. – P. 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.043>
- [122] Cardell, C. Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France / C. Cardell, F. Delalieux, K. Roumpopoulos // *Construction and Building Materials*. – 2003. – № 3. – P. 165-179. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00104-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00104-6)
- [123] Cardell, C. Weathering of limestone building material by mixed sulfate solution. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms / C. Cardell, D. Benavente J. Rodriguez-Gordilli // *Materials characterization*. – 2008. – № 10 (59). – P. 1371-1385. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.12.003>
- [124] Cardiano, P. Study and characterization of the ancient bricks of monastery of “San Filippo di Fragalà” in Frazzanò (Sicily) / P. Cardiano, S. Ioppolo, C. De Stefano // *Analytica Chimica Acta*. – 2004. – № 1 (519). – P. 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.05.042>
- [125] Chanvillard G. Effect of the pore size distribution on crystallization pressure / G. Chanvillard, G. Sherer // *KONSTA-GDOUTOS, M.S. (eds) Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. – Springer, Dordrecht. – 2006. – P. 1-6. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5104-3_81
- [126] Chase, G. W. Characterization of the interface between brick and mortar : A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy / Chase G. W. ; Iowa State University. – Iowa, 1983. – 203 p.
- [127] Cherblanc, F. Influence of water content on the mechanical behaviour of limestone: Role of the clay minerals content / F. Cherblanc, J. Berthonneau, P. Bromblet // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – № 49. – P. 2033-2042. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0911-y>
- [128] Colas, E. Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration : discipline Géosciences : Thèse pour obtenir le grade de Docteur / Colas E. ; Université de Reims Champagne-Ardenne. – 2011. – 321 p.
- [129] Coletti, C. How to face the new industrial challenge of compatible, sustainable brick production: Study of various types of commercially available bricks / C. Coletti, G. Cultrone, L. Maritan // *Applied Clay Science*. – 2016. – № 124-125. – P. 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.014>
- [130] Coletti, C. Combined multi-analytical approach for study of pore system in bricks: How much porosity is there? / C. Coletti, G. Cultrone, L. Maritan // *Materials Characterization*. – 2016. – № 121. – P. 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.09.024>

- [131] Collier, N. C. Theoretical development and validation of a Sharp Front model of the dewatering of a slurry by an absorbent substrate / N. C. Collier, M. A. Wilson, M. A. Carter // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2007. – № 13 (40). – P. 4049-4054. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/13/022>
- [132] Cooke, R. U. Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments / R. U. Cooke // *Earth Surface Processes*. – 1979. – № 4. – P. 347-359. <https://doi.org/10.1002/esp.3290040405>
- [133] Costa, E. B. C. Squeeze flow of mortars on brick substrate and its relation with bond strength / E. B. C. Costa, M. S. de França, F. L. N. Bergossi // *Construction and Building Materials*. – 2020. – № 265. – P. 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120298>
- [134] Cultrone, G. Behavior of brick samples in aggressive environments / G. Cultrone, M. J. De La Torre, E. M. Sebastian // *Water, Air and Soil Pollution*. – 2020. – № 119. – P. 191-207. <https://doi.org/10.1023/A:1005142612180>
- [135] Cultrone, G. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks / G. Cultrone, E. M. Sebastian, K. Elert // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2004. – № 24. – P. 547-564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)
- [136] Cultrone, G. Influence of pore system characteristics on limestone vulnerability: a laboratory study / G. Cultrone, L. G. Russo, C. Calabrò // *Environmental Geology*. – 2008. – № 54. – P. 1271-1281. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0909-1>
- [137] Cultrone, G. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials / G. Cultrone, E. M. Sebastian // *Environmental Geology*. – 2008. – № 56. – P. 729-740. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1332-y>
- [138] Cultrone, G. Durability of masonry systems: a laboratory study / G. Cultrone, E. M. Sebastian, M. Ortego Huertas // *Construction and Building Materials*. – 2007. – № 21. – P. 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.008>
- [139] Cultrone, G. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the «Triangul Bastion», Riga (Latvia) / G. Cultrone, I. Sidraba, E. M. Sebastian // *Applied Clay Science*. – 2005. – № 28. – P. 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.02.005>
- [140] D'Agostino, D. Moisture dynamics in an historical masonry structure. The Cathedral of Lecce (South Italy) / D. D'Agostino // *Building and Environment*. – 2013. – № 63. – P. 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.008>
- [141] Davison, J. I. Loss of Moisture from Fresh Mortars to Bricks / J. I. Davison // *Materials, Research and Standards* 1. – 1961. – № 5. – P. 385-388.

- [142] Dejian, Li. Analysis of microscopic pore structures of rocks before and after water absorption / Li Dejian, W. Guilian, H. Liqiang // Mining Science and Technology. – 2011. – № 2 (21). – P. 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.02.002>
- [143] Demarco, M. The impact of partial water saturation on rock strength: an experimental study on sandstone / M. Demarco, E. Jahns, J. Rüdrieh // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2007. – № 4 (158). – P. 869-882. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2007/0158-0869>
- [144] Derluyn, H. Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials / H. Derluyn, H. Janssen, J. Carmeliet // Construction and Building Materials. – 2011. – № 9 (25). – P. 3685–3693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063>
- [145] Derluyn, H. Moisture transfer across the interface between brick and mortar joint / H. Derluyn, H. Janssen, P. Moonen, J. Carmeliet // Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in Nordic Countries. – Copenhagen : Technical University of Denmark, 2008. – P. 865-872.
- [146] Desarnaud, J. The pressure induced by salt crystallization in confinement / J. Desarnaud, N. Shahidzadeh-Bonn // Scientific Reports. – 2016. – № 6-30856. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep30856>
- [147] DIN 1048-2 Prüfverfahren Für Beton. Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen. – 1991. – 6 p.
- [148] Dizhur, D. In-situ assessment of the physical and mechanical properties of vintage solid clay bricks / D. Dizhur, R. Lumantarna, D. T. Biggs // Materials and Structures. – 2017. – № 50. – P. 63-86. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0939-9>
- [149] Dondi, M. Water vapour permeability of clay bricks / M. Dondi, P. Principi, M. Raimondo // Construction and Building Materials. – 2003. – № 4 (17). – P. 253-258. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00117-4).
- [150] Dondi, M. Thermal Conductivity of Clay Bricks / M. Dondi, F. Mazzanti, P. Principi // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2004. – № 1 (116). – P. 8-14.
- [151] Dondi, M. Microstructure and mechanical properties of clay bricks: comparison between fast firing and traditional firing / M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi // British Ceramic Transactions. – 1999. – № 1 (98). – P. 12-18. <https://doi.org/10.1179/096797899680183>
- [152] Elert, K. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure / K. Elert, G. Cultrone, C. Rodriguez Navarro // Journal of Cultural Heritage. – 2003. – № 2 (4). – P. 91-99. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00020-7)

- [153] El-Midany, A. A. Mineralogical, physical and chemical characteristics of historic brick-made structures / A. A. El-Midany, H. M. Mahmoud // *Mineralogy and Petrology*. – 2015. – № 109. – P. 733-739. <https://doi.org/10.1007/s00710-015-0406-2>
- [154] Espinosa-Marzal, R. Mechanisms of damage by salt / R. Espinosa-Marzal G. Scherer // *Geological society london special publications*. – 2010. – № 331. – P. 61-77. <https://doi.org/10.1144/sp331.5>.
- [155] Espinosa-Marzal, R. Advances in understanding damage by salt crystallization / R. Espinosa-Marzal G. Scherer // *Accounts of chemical research*. – 2010. – № 6 (43). – P. 897-905. <https://doi.org/10.1021/ar9002224>.
- [156] Fahey, B. D. An experimental study of the effect of humidity and temperature variations on the granular disintegration of argillaceous carbonate rocks in cold climates / B. D. Fahey, D. F. Dagesse // *Artic and Alpine Research*. – 1984. – № 3 (16). – P. 291-298. <https://doi.org/10.2307/1550938>
- [157] Fernandes F. Evaluation of the Compressive Strength of Ancient Clay Bricks Using Microdrilling / F. Fernandes, P. Lourenço // *Journal of materials in civil engineering*. – 2007. – № 9 (19). – P. 791-800. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(791\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(791))
- [158] Fernandes F. Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties / F. Fernandes, P. Lourenço, F. Castro // *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. – Dordrecht : Dan M.B., Přikryl R., Török Á. (eds) : Springer, 2010. – P. 29-48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_3
- [159] Flatt, R. Predicting salt damage in practice: A theoretical insight into laboratory tests / R. Flatt, N. A. Mohamed, F. Caruso // *RILEM Technical Letters*. – 2017. – № 2. – P. 108-118. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.41>
- [160] Flatt, R. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated / R. Flatt // *Journal of Crystal Growth*. – 2002. – № 3-4 (242). – P. 435-454. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)01429-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01429-X).
- [161] Fort, R. Colmenar Limestone, Madrid, Spain: considerations for its nomination as a Global Heritage Stone Resource due to its long-term durability / R. Fort, M. J. Varas-Muriel, M. Alvarez de Buergo // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2014. – № 407. – P. 121-135. <https://doi.org/10.1144/SP407.8>
- [162] Fourmentin, M. NMR observation of water transfer between a cement paste and a porous medium / M. Fourmentin, P. Faure, S. Rodts // *Cement and Concrete Research*. – 2017. – № 95. – P. 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.027>

- [163] Franzen, C. Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity / C. Franzen, P. W. Mirwald // *Environmental Geology*. – 2004. – № 3 (46). – P. 391-401. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1040-1>
- [164] Franzoni, E. Compressive behaviour of brick masonry triplets in wet and dry conditions / E. Franzoni, C. Gentilini, G. Graziani // *Construction and Building Materials*. – 2015. – № 82. – P. 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.052>
- [165] Freitas, V. P. De. Moisture migration in building walls – Analysis of the interface phenomena / V. P. De Freitas, V. Abrantes, P. Crausse // *Building and Environment*. – 1996. – № 2 (31). – P. 99–108. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00027-5)
- [166] Garcia-Fernandez, C. C. Effect of environmental relative humidity in the tensile strength of layering in slate stone / C. C. Garcia-Fernandez, M. I. Alvarez-Fernandez, R. Cardoso // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2020. – № (79). – P. 1399–1411. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01619-7>
- [167] Garcia-Morales, S. Humidity studies in Quinones Chapel, Medina Del Campo / S. Garcia-Morales, A. Palomo // *Transactions on the Built Environment*. – № 4. – P. 275-282, 1993. <https://doi.org/10.2495/STR930241>
- [168] Garijo, L. The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars / L. Garijo, X. Zhang, G. Ruiz // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 169. – P. 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.016>
- [169] Germinario, L. Variability of technical properties and durability in volcanic tuffs from the same quarry region – examples from Northern Hungary / L. Germinario, Á. Török // *Engineering Geology*. – 2019. – № 262. – P. 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105319>
- [170] Gizzi, S. Karst soil and rising damp in Sassari - guide lines for restoration of Canopoleno complex / S. Gizzi, D. Scudino, S. Della Torre // *7th International Symposium on the Conservation of Monuments of Mediterranean Basin*. – Orleans. – 2007. – 9 p.
- [171] Godts, S. Investigating salt decay of stone materials related to the environment, a case study in the St. James church in Liège, Belgium / S. Godts, R. Hayen, H. De Clercq // *Studies in Conservation*. – 2017. – № 6 (62). – P. 1-14. <https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1236997>
- [172] Gor, G. Y. Adsorption-induced deformation of nanoporous materials – a review / G. Y. Gor, P. Huber, N. Bernstein // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – № 4. – P. 1-24. <https://doi.org/10.1063/1.4975001>
- [173] Groot, C. J. The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry / C. J. Groot, J. A. Larbi // *HERON*. – 1999. – № 2 (44).

- [174] Guimarães, A. S. The Interface Effect in the Water Absorption in Ceramic Brick / A. S. Guimarães, V. P. de Freitas, J. M. P. Q. Delgado // *Energy Procedia*. – 2015. – № 78. – P. 1395-1400. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.160>
- [175] Guimarães, A. S. Interface influence on moisture transport in buildings / A. S. Guimarães, J. M. P. Q. Delgado, A.C. Azevedo // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 162. – P. 480-488, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.040>
- [176] Günther, G. Novel Insights into Nanopore Deformation Caused by Capillary Condensation / G. Günther, J. Prass, O. Paris // *Physical Review Letters*. – 2008. – № 8 (101). – P. 086104-1–086104-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.086104>
- [177] Halim, A. A. Diagnosis of dampness in conservation of historic buildings / A. A. Halim, S. N. Harun, Y. Hamid // *Journal Design + Built*. – 2012. – № 1 (5). – P. 1-14.
- [178] Hall, C. Water movement in porous building materials-I. Unsaturated flow theory and its applications. *Building and Environment*, 12, 117-125, 1977.
- [179] Hall, C. Moisture dynamics in walls: response to micro-environment and climate change / C. Hall, A. Hamilton, W. D. Hoff // *Proceedings of the Royal Society A*. – 2011. – № 467. – P. 194-211. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0131>
- [180] Hall, C. Porosity–density relations in stone and brick materials / C. Hall, A. Hamilton // *Materials and Structures*. – 2015. – № 5 (48). – 1265-1271. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0231-1>
- [181] Hall, C. *Water Transport in Brick, Stone and Concrete* / C. Hall, W. D. Hoff. – London : CRC Press, 2002. – 318 p.
- [182] Hall, C. Rising damp: capillary rise dynamics in walls / C. Hall, W. D. Hoff // *Proceedings of the Royal Society A*. – 2007. – № 463. – P. 1871-1884. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1855>
- [183] Hall, K. Weathering by wetting and drying: some experimental results / K. Hall, A. Hall // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 1996. – № 21. – P. 365–376. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199604\)21:4%3C365::AID-ESP571%3E3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199604)21:4%3C365::AID-ESP571%3E3.0.CO;2-L)
- [184] Hamès, V. Variations dilatométriques de roches soumises à des cycles humidification-séchage / V. Hamès, J-P. Lautridou, A. Ozer // *Geographie Physique et Quaternaire*. – 1987. – № 3 (41). – P. 345-354. <https://doi.org/10.7202/032690ar>
- [185] Harmati, N. Rising damp analysis and selection of optimal handling method in masonry construction / N. Harmati, Ž. Jakšić, M. Trivunic // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. – 2014. – № 4 (58). – P. 431-444. <https://doi.org/10.3311/PPci.2113>
- [186] Hendrickx, R. Measuring and modelling water transport from mortar to brick / R. Hendrickx, K. Van Balen, D. Van Gemert // *Building materials and building technology to preserve the built heritage : 1st WTA-International PhD symposium*. – Leuven, Belgium : Schueremans L. (editor), 2009. – P. 175-194.

- [187] Hendrickx, R. Experimental determination of liquid transport properties on salt-contaminated porous stone / R. Hendrickx, S. Roels, H. De Clercq // 12th international conference on durability of building materials components. – Porto, 2011. – P. 125-132.
- [188] Hendrickx, R. Water Transport Between Mortar and Brick: The Influence of Material Parameters / R. Hendrickx, S. Roels, K. Van Balen // Historic Mortars : RILEM Bookseries. – Dordrecht : Springer, 2012. – vol. 7. – P. 329-341. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_26
- [189] Hirschwald, J. Die Prufung der natuerlichen Bausteine auf ihre Wetterbestndigkeit / J. Hirschwald. – Berlin : Ernst & Sohn, 1908. – 675 p.
- [190] Hoffmann, D. Relationship between pore structure *and* other physico-technical characteristics of stone / D. Hoffmann, K. Niesel, R. Plagge // Proceedings of the 8th international congress on deterioration and conservation of stone : Volume 1. – Berlin : Josef Riederer, 1996. – P. 461-472.
- [191] Hola, A. Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings – the overview of methods / A. Hola, // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2017. – № 1 (251). – P. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012067>
- [192] Holm, A. Feuchtetransport uber Materialgrenzen im Mauerwerk / A. Holm, M. Krus, H. M. Künzel // Restoration of Buildings and Monuments. – 1996. – № 2 (5). – P. 375-396. <https://doi.org/10.1515/rbm-1996-5130>
- [193] Hu, M. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles / M. Hu, Y. Liu, J. Ren // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – № 78. – P. 543-556. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1080-x>
- [194] Hudec, P. Weathering of rocks in arctic and sub-arctic environment / P. Hudec // Proceedings of the Symposium on the Geology of the Canadian Arctic. – J. D. Aitken & D. J. glass (eds.), 1974. – P. 313-335.
- [195] Hudec, P. Freezing or osmosis as deterioration mechanism of concrete and aggregate? / P. Hudec // Proceedings of the 2nd workshop on low temperature effects on concrete. – Nuclear Regulatory Commission (NRC), 1991. – P. 1-8.
- [196] Hudec, P. Changes in engineering properties of weak and weathered rock with time / P. Hudec // Characterization of weak and weathered rock masses : special publication. –Oregon, 1997. – P. 53-70.
- [197] Hudec, P. Rock properties and processes of rapid weathering and deterioration / P. Hudec // Proceedings of 8th international IAEG congress. – Balkema, Rotterdam, 1998. – P. 335-341.
- [198] Hudec, P. Stress relaxation of rocks and its relationship to rock durability properties / P. Hudec, I. Dananaj // Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment : Engineering Geology for Developing Countries. – Durban, South Africa. – 2002. – P. 1094-1104.

- [199] Hudec, P. Effect of Water Sorption on Carbonate Rock Expansivity / P. Hudec, N. Sitar // Canadian Geotechnical Journal. – 1975. – № 2 (12). – P. 179-186.
- [200] Iglesia, A. La. Salt crystallization in porous construction materials I. Estimation of crystallization pressure / A. La Iglesia, V. González, V. López-Acevedo // Journal of Crystal Growth. – 1997. – № 1–2 (177). – P. 111-118. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(96\)01072-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(96)01072-X)
- [201] Indelicato, F. A statistical method for the assessment of concrete strength through microcores / F. Indelicato // Materials and Structures. – 1993. – № 26. – P. 261-267. <https://doi.org/10.1007/BF02472947>
- [202] Indelicato, F. Estimate of concrete cube strength by means of different diameter cores: A statistical approach / F. Indelicato // Materials and Structures. – 1997. – № 30. – P. 131-138. <https://doi.org/10.1007/BF02486384>
- [203] Ingham, J. Predicting the frost resistance of building stone / J. Ingham // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 2005. – № 38. – P. 387-399. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-068>
- [204] ISO/DIS 7032. Cores of hardened concrete – Taking examination and testing in compression : Draft International Standard / International Organization of Standardization, 1983. – 9 p.
- [205] Jamtveit, B. Reaction enhanced permeability during retrogressive metamorphism / B. Jamtveit, A. Malthe-Sørenssen, O. Kostenko // Earth and Planetary Science Letters. – 2008. – № 3-4 (267). – P. 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.12.016>.
- [206] Janssen, H. Moisture transfer through mortar joints: interface resistances or hygric property changes / H. Janssen, H. Derluyn, J. Carmeliet // Proceedings of the 12th Symposium for Building Physics. – Dresden, Germany, 2007. – Volume 2. – P. 808-815.
- [207] Janssen, H. Moisture transfer through mortar joints – a sharp-front analysis / H. Janssen, H. Derluyn, J. Carmeliet // Cement and Concrete Research. – 2012. – № 9 (42). – P. 1105-1112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.004>
- [208] Jeannette, D. Importance of the pores structures during the weathering process of stones in monuments / D. Jeannette // Soil and Sediments. – Springer, 1997. – P. 177-190. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60525-3_9
- [209] Jia, H., W. Xiang Direct observation of the pore structure of sandstone after repeated frost action / Jia H., W. Xiang // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2015. – № 20. – P. 11611-11621.
- [210] Johari, I. Effect of the change of firing temperature on microstructure and physical properties of clay bricks from Beruas (Malaysia) / I. Johari, S. Said, B. Hisham // Science of Sintering. – 2010. – № 2 (42). – P. 245-254. <https://doi.org/10.2298/SOS1002245J>

- [211] Kaczmarek, A. Evaluation of Frost Impact on Traditional Ceramic Building Materials Utilized in Facing Walls / A. Kaczmarek, M. Wesołowska // *Materials* (Basel). – 2022. – № 15. – P. 5653-5662. <https://doi.org/10.3390/ma15165653>
- [212] Kamh, G. M. E. Pore size distribution and wall side orientation controlling salt susceptibility index “SSI” and weathering rate of stratified Pharaonic rock art / G. M. E. Kamh, B. Ismael, C. T. Oguchi // *Restoration of Buildings and Monuments*. – 2013. – № 5 (19). – P. 341-362. <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6617>
- [213] Kamh, G. M. E. Modification of Damage Category Scale and Non-destructive Geotechnical Studies for Weathering Investigations of Oolitic Limestone at the El-Shatbi Greco-Roman Tombs / G. M. E. Kamh, C. T. Oguchi // *Restoration of Buildings and Monuments*. – 2013. – № 5 (19). – P. 321-340. <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6616>
- [214] Kamh, G. M. E. Factors Controlling Salt Susceptibility and Alteration Indices on Salt Weathering of Oolitic Limestone Using Single Salt at Five Weathering Regimes, a Case Study / G. M. E. Kamh, C. T. Oguchi, K. Watanabe // *Restoration of Buildings and Monuments*. – 2013. – 6 (13). – P. 393-416. <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6625>
- [215] Kaneuji, M. Correlation between Pore Size Distribution and Freeze Thaw Durability of Coarse Aggregate in Concrete : Interim Report : Publication FHWA/IN/JHRP-78/15 / Joint Highway Research Project. – Indiana Department of Transportation and Purdue University : West Lafayette, Indiana, 1978. <https://doi.org/10.5703/1288284313976>
- [216] Kaneuji, M. The relationship between an aggregate’s pore size distribution and its freeze thaw durability in concrete / M. Kaneuji, D. N. Winslow, W. L. Dolch // *Cement and Concrete Research*. – 1980. – № 3 (10). – P. 433-441. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90119-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90119-2)
- [217] Karoglou, M. Water Sorption Isotherms of Some Building Materials / M. Karoglou, A. Moropoulou, Z. B. Maroulis // *Drying Technology*. – 2005. – № 1-2 (23). – P. 289-303. <https://doi.org/10.1081/drt-200047948>
- [218] Keppert, M. Damage of porous stones by salt crystallization / M. Keppert, M. Cachova, J. Fort // *Computational methods and experimental measurements*. – 2015. – № 59. – P. 333-341. <https://doi.org/10.2495/CMEM150301>
- [219] Kiepsch, S. Interplay of vapor adsorption and liquid imbibition in nanoporous Vycor glass / S. Kiepsch, R. Pelster // *Physical Review E*. – 2016. – № 4 (93). – P. 043128-1–043128-11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.043128>
- [220] Klopfer, H. Feuchte / H. Klopfer // *Lehrbuch der Bauphysik*. – Stuttgart : Teubner Verlag, 1985. – P. 273-398.

- [221] Koh, Y. The influence of pore structure of concrete made with absorptive aggregates on the frost durability of concrete / Y. Koh, E. Kamada // *Proceedings RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials*. – Prague : Artia, 1973. – P. F45-F62.
- [222] Kolesnikov, A. L. Effects of enhanced flexibility and pore size distribution on adsorption-induced deformation of mesoporous materials / A. L. Kolesnikov, N. Georgi, Y. A. Budkov // *Langmuir*. – 2018. – № 34. – P. 7575-7584. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00591>
- [223] Koniorczyk, M. Salt crystallization-induced damage of cement mortar microstructure investigated by multi-cycle mercury intrusion / M. Koniorczyk, P. Konca, D. Gawin // *Proceedings of the VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. – Toledo : International Center for Numerical Methods in Engineering, 2013. – P. 1-6
- [224] Korothe, S. R. Evaluation and improvement of frost durability of clay bricks : A Thesis in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy / Korothe S. R. ; Concordia University. – Montreal, 1997. – 223 p.
- [225] Kozłowski, R. Decay and Conservation of Pińczów Porous Limestone. I. Lithology and Weathering / R. Kozłowski, J. Magiera, J. Weber // *Studies in Conservation*. – 1990. – № 4 (35). –P. 205-221. doi.org/10.1179/sic.1990.35.4.205
- [226] Kukko, H. Frost effects on the microstructure of high strength concrete / H. Kukko // *Proceedings pro001 : International RILEM Workshop on Durability of High Performance Concrete*. – Edited by H. Sommer, 1994. – P. 100-108.
- [227] Kung, J. H. Frost durability of clay bricks – evaluation criteria and quality control Ottawa: National Research Council of Canada / J. H. Kung // *Proceedings of the CBAC/DBR Manufacturer's Symposium : Proceedings No. 8 of the Division of Building Research*. – Ottawa, 1984. – 48 p.
- [228] Kung, J. H. Frost durability of Canadian clay bricks / J. H. Kung // *Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference*. – Melbourne, Australia, 1985. – P. 245-252.
- [229] Labus, M. Rock porosity determination in the historical monuments preservation / M. Labus // *Civil and Environmental Engineering Reports*. – 2009. – № 1 (9). – P. 103-113.
- [230] Labus, M. Sandstone degradation: an experimental study of accelerated weathering / M. Labus, J. Bochen // *Environmental Earth Sciences* <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1642-y>
- [231] Lanas, J. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior / J. Lanas, J. I. Alvarez // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – № 11 (33). – P. 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- [232] Lange, H. Determination of the Frost Resistance of Limestone Aggregates in the Light of Porosity Investigation / H. Lange, S. Modry // *Proceedings of the International Symposium on the Durability of Concrete*. – Prague : Academia, 1969. – P. B129- B141.

- [233] L'Anson, S. J. Water movement in porous building materials – VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls / S. J. L'Anson, W. D Hoff // *Building and Environment*. – 1986. – № 3-4 (21). – P. 195-200. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(86\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(86)90030-2)
- [234] Larsen, P. K. Moisture physical properties of bricks. An investigation of Falkenløwe, Stralsund and Hartmann *bricks* / P. K. Larsen // Teknisk rapport, 343. – Holzkirchen : Technical University of Denmark, 1995. – 34 p.
- [235] Lawrence, M. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars : Faculty of Engineering and Design, Department of Architecture and Civil Engineering : A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Lawrence M. ; University of Bath. – 2006. – 316 p.
- [236] Lawrence, M. Influence of Interfacial Material Pore Structure on the Strength of the Brick/Lime Mortar Bond / M. Lawrence, P. Walker, Z. Zhou // *Historic Mortars* : J. Válek, J. Hughes, C. Groot (eds) : RILEM Bookseries. – Dordrecht : Springer, 2012. – Volume 7. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_29
- [237] Li, J. Experimental Study of the Pore Structure Deterioration of Sandstones under Freeze-Thaw Cycles and Chemical Erosion / J. Li, R. B. Kaunda, L. Zhu // *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – № 3 (14). – P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.005>
- [238] Li, J. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone / / J. Li, R. B. Kaunda, K. Zhou // *Cold Regions Science and Technology*. – 2018. – № 154. – P. 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.06.015>
- [239] Li, L. Pore property as an indicator of macro-deterioration in slightly weathered tuffs / L. Li, Y. Tan, B. Huang // *Engineering Geology*. – 2020. – № 267. – P. 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105492>
- [240] Li, Y. Effect of ambient humidity on the elasticity and deformation of unweathered granite / Y. Li, K. Leith, M. A. Perras // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024004, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JB024004>
- [241] Lindquist, J. E. Frost resistance of natural Stone, the Importance of Micro- and Nano-Porosity / J. E. Lindquist, K. Malaga, B. Middendorf ; Icelandic Building Research Institute. – 2007 // ResearchGate : professional network for scientists (site). – URL: https://www.researchgate.net/publication/238660320_Frost_Resistance_of_Natural_Stone_the_Importance_of_Micro_and_Nano-porosity (дата обращения 15.12.2024).
- [242] Litvan, G. G. Phase transitions of adsorbates IV. Mechanism of frost action in hardened cement paste / G. G. Litvan // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1972. – 1 (55). – P. 38-43.

- [243] Litvan, G. G. Pore structure and frost susceptibility of building materials / G. G. Litvan // Proceedings RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials. – Prague : Artia, 1973. – P. F17-F30.
- [244] Litvan, G. G. Testing the frost susceptibility of bricks / G. G. Litvan // American Society for Testing and Materials Special Technical Publication. – 1975. – № 589. – P. 123-132.
- [245] Litvan, G. G. The mechanism of frost action in concrete – theory and practical implications / G. G. Litvan // Proceedings of Workshop on Low Temperature Effects on Concrete. – Sapporo, Hokkaido, Japan, 1988. – P. 115-134.
- [246] Liu, J. Characteristics and weathering mechanisms of the traditional Chinese blue brick from the ancient city of Ping Yao / J. Liu, Z. Zhang // Royal Society Open Science. – 2020. – № 7. – P. 200058. <https://doi.org/10.1098/rsos.200058>
- [247] Lopez-Arce, P. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings / P. Lopez-Arce, J. Garcia-Guinea // Building and Environment. – 2005. – № 7 (40). – P. 929-941. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.027>
- [248] Lourenco, P. B. Characterization, damage and repair of brick masonry / P. B. Lourenco, R. van Hees, F. Fernandes // Structural Rehabilitation of Old Buildings : Building Pathology and Rehabilitation series. – Berlin : Springer, 2014. – Volume 2. – P. 109-130. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1_4
- [249] Lourenco, P. B. Handmade clay bricks: Chemical, physical and mechanical properties / P., B. Lourenco, F. Fernandes, F. Castro // International Journal of Architectural Heritage. – 2010. – № 1(4). – P. 38-58. <https://doi.org/10.1080/15583050902871092>
- [250] Lubelli, B. A. Effect of moisture on tuff stone weathering. Use and conservation of Rhenish tuff in the Netherlands, Germany, Flanders and Denmark / B. A. Lubelli, T. G. Nijland, H-J. Tolboom // Proceedings of the symposium in Amersfoort. – Amersfoort : Cultural Heritage Agency of the Netherlands (RCE), 2017. – P. 65-83.
- [251] Lubelli, B. A. Effectiveness of methods against rising damp in buildings: Results from the EMERISDA project / B. A. Lubelli, R. P. J. van Hees, J. Bolhuis // Journal of Cultural Heritage. – 2018. – № 31. – P. S15-S22. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.025>
- [252] Lubelli, B. A. Moisture induced weathering of volcanic tuffstone / B. A. Lubelli, T. G. Nijland, H-J. Tolboom // Construction and Building Materials. – 2018. – № 187. – P. 1134-1146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.002>
- [253] Maage, M. Frost Resistance and Pore Size Distribution in Bricks / M. Maage // Materials and Structures. – 1984. – № 17. – P. 345-350. <https://doi.org/10.1007/BF02478706>

- [254] Marco Castaño, L. D. Failures in the standard characterization of carbonate dimension stone durability during freeze-thaw testing / L. D. J. Marco Castaño, Martinez-Martinez, D. Benavente // Global Stone Congress. – Alicante, Spain, 2010. – P. 1-5.
- [255] Martínez-Martínez, J. Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes / J. Martínez-Martínez, D. Benavente, M. Gomez-Heras // Construction and Building Materials. – 2013. – № 38. – P. 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.059>
- [256] Mason, G. Rising damp / G. Mason // Building Science. – 1974. – № 3 (9). – P. 227-231. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(74\)90021-8](https://doi.org/10.1016/0007-3628(74)90021-8)
- [257] Massari, G. Damp Buildings, Old and New / G. Massari, I. Massari // Bulletin of the Association for Preservation Technology. – 1985. – № 1 (17). – P. 2-30.
- [258] Matsuoka, N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach / N. Matsuoka // Cold Regions Science and Technology. – 1990. – № 3 (17). – P. 253-270. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(05\)80005-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(05)80005-9)
- [259] Miglio, B. F. Assessment of the Durability of porous Limestones. Specification and Interpretation of Test Data in UK Practice / B. F. Miglio, D. M. Richardson, T. S. Yates // Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair. – West Conshohocken : ASTM International, 2000. – P. 57-70. <https://doi.org/10.1520/STP13539S>
- [260] Miniotaite, R. Sorption processes and moisture deformations in building materials / R. Miniotaite // Research in building physics : Proceedings of the Second International Conference on Building Physics, Leuven, Belgium, 14-18 September 2003. – London : CRC Press, 2003. – P. 181-189. <https://doi.org/10.1201/9781003078852>
- [261] Mohamad, E.T. Influence of moisture content on the strength of weathered sandstone / E. T. Mohamad, I. Komoo, K. A. Kassim // Malaysian Journal of Civil Engineering. – 2008. – № 1 (20). – P. 137-144. <https://doi.org/10.11113/mjce.v20.15762>
- [262] Mohammad, B. K. The salt durability of some Jordanian limestones as a function of their petrophysical properties / B. K. Mohammad // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2003. – № 8. – P. 1-13.
- [263] Moh'd, B. K. Rapid prediction of Building Research Establishment limestone durability class from porosity and saturation / B. K. Moh'd, R. J. Howarth, C. H. Bland // Quarterly Journal of Engineering Geology. – 1996. – № 229. – P. 285-297. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P4.0>
- [264] Molina, E. The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials / E. Molina, G. Cultrone, E. Sebastián // Engineering Geology. – 2011. – № 3-4. – P. 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.008>

- [265] Molina, E. The influence of rock fabric in the durability of two sandstones used in the Andalusian Architectural Heritage (Montoro and Ronda, Spain) / E. Molina, D. Benavente, E. Sebastián // *Engineering Geology*. – 2015. – № 197. – P. 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.009>
- [266] MØller, E. B. Rising damp, a reoccurring problem in basements: a case study with different attempts to stop the moisture / E. B. MØller, B. Olsen // *Proceedings of 9th Nordic symposium on building physics*. – Tampere, Finland : Tampere University of Technology, 2011. – Volume 2. – P. 765–772.
- [267] Moropoulou, A. Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures / A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou // *Construction and Building Materials*. – 2000. – № 1 (14). – P. 35-46. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(99\)00045-8](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(99)00045-8)
- [268] Morse, J. W. The kinetics of calcium carbonate dissolution and precipitation / J. W. Morse // Reeder, R.J. (Ed.), *Carbonates: Mineralogy and Chemistry*. – Washington : Mineralogy and Geochemistry Society of America, 1983. – Volume 11. – P. 227-264. <https://doi.org/10.1515/9781501508134-011>
- [269] Morse, J. W. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals / J. W. Morse, R. S. Arvidson // *Earth-Science Reviews*. – 2002. – № 1-2 (58). – P. 51-84. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(01\)00083-6](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(01)00083-6)
- [270] Mugridge, S. Disintegration of shale by cyclic wetting and drying and frost action / S. Mugridge, H. R. Young // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1982. – № 4 (20). – P. 568-576. <https://doi.org/10.1139/e83-054>
- [271] Navarre-Sitchler, A. K. Porosity and surface area evolution during weathering of two igneous rocks / A. K. Navarre-Sitchler, D. R. Cole, G. Rother // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – № 109. – P. 400-413. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.012>
- [272] Netinger Grubeša, I. Pore Structure as a Response to the Freeze/Thaw Resistance of Mortars / I. Netinger Grubeša, B. Markovic, M. Vracevic // *Materials*. – 2019. – № 12. – 3196. <https://doi.org/10.3390/ma12193196>
- [273] Netinger Grubeša, I. Influence of the Size and Type of Pores on Brick Resistance to Freeze-Thaw Cycles / I. Netinger Grubeša, M. Vracevic, V. Ducman // *Materials*. – 2020. – № 13. – 3717. <https://doi.org/10.3390/ma13173717>
- [274] Netinger, I. Brick and mortar of sufficient durability: the investigation and results / I. Netinger, M. Vracevic, V. R. Busic // *Economy of eastern Croatia yesterday, today, tomorrow : Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Economics, Croatia*. – 2013. – № 2. – P. 180-188.
- [275] Nežerka, V. Microstructure, Chemical Processes and Experimental Investigation of Lime-Based Mortars / V. Nežerka. – 2012 // *Semantic Scholar : a free, AI-powered search and discovery engine*

- for scientific literature (site), 2012. <https://www.semanticscholar.org/paper/Microstructure-%2C-Chemical-Processes-and-of-Mortars-Ne%C5%BEerka/7e1861c2a773b8ad3d0e0e1d79c5728bcd3f6518> (дата обращения 07.10.2024).
- [276] Nicholson, T. Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones / T. Nicholson // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2001. – № 8 (26). – P. 819-838. <https://doi.org/10.1002/esp.228>
- [277] Nieminen P. Strain caused by temperature in a masonry structure. *Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference*. – Melbourne, Australia : Tom McNeilly, John C. Scrivener (eds), 1985. – P. 347-350.
- [278] Nieminen, P. Porosity and frost resistance of clay bricks / P. Nieminen, M. Romu // *Proceedings of the 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. – London : Elsevier Applied Science, 1988. – Volume 1. – P. 103-109.
- [279] Nogueira, R. Design and behavior of traditional lime-based plasters and renders. Review and critical appraisal of strengths and weaknesses / R. Nogueira, A. P. Ferreira Pinto, A. Gomes // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – № 89. – P. 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.005>
- [280] Noiriél, C. Intense fracturing and fracture sealing induced by mineral growth in porous rocks / C. Noiriél, F. Renard, M. L. Doan // *Chemical Geology*. – 2010. – № 3-4 (269). – P. 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.018>
- [281] Ondrášik, M. Rock pore structure as main reason of rock deterioration / M. Ondrášik, M. Kopecký // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2014. – № 1 (36). – P. 79-88. <https://doi.org/10.2478/sgem-2014-0010>
- [282] Ordóñez, S. Physical properties and petrographic characteristics of some Bateig Stone varieties / S. Ordóñez, M. A. García del Cura, R. Fort // *Proceedings of the 7th International IAEG Congress*. – Lisbon, Balkema, Rotterdam, 1994. – P. 3595-3603.
- [283] Ordóñez, S. Pore size distribution and the durability of a porous limestone / S. Ordóñez, R. Fort, M. A. García del Cura // *Quarterly Journal of Engineering Geology*. – 1997. – № 30. – P. 221-230. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P3.04>
- [284] Özkaya, Ö. A. Properties of Roman bricks and mortars used in Serapis temple in the city of Pergamon / Ö.A. Özkaya, H. Böke // *Materials Characterization*. – 2009. – № 9 (60). – P. 995-1000. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.04.003>
- [285] Palmer, L. A. Some absorption properties of clay bricks / L. A. Palmer // *Bureau of Standards journal of research*. – 1929. – № 1 (3). – P. 105-127.

- [286] Pavlík, Z. Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis / Z. Pavlík, J. Žumár, I. Medved // *Transport in Porous Media*. – 2012. – № 91. – P. 939-954. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9884-9>
- [287] Pavlík, Z. Experimental analysis of material properties of historical ceramic bricks and their potential current replacements / Z. Pavlík, T. Kulovaná, J. Žumár // *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIV*. – Southampton : WIT Press, 2015. – P. 327-335.
- [288] Pejon, O. J. Analysis of cyclic swelling of mudrocks / O. J. Pejon, L. V. Zuquette // *Engineering Geology*. – 2002. – № 67. – P. 97-108. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00147-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00147-3)
- [289] Pender, R. J. The Behaviour of Water in Porous Building Materials and Structures / R. J. Pender // *Reviews in Conservation*. – 2004. – № 5. – P. 49-62. <https://doi.org/10.1179/sic.2004.49.Supplement-1.49>
- [290] Perrier, L. Poromechanics of adsorption-induced swelling in microporous materials: a new poromechanical model taking into account strain effects on adsorption / L. Perrier, G. Pijaudier-Cabot, D. Grégoire // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2015. – № 27. – P. 195-209. <https://doi.org/10.1007/s00161-014-0359-4>.
- [291] Pietrak, K. Measurement of thermal, hygric and physical properties of bricks and mortar common for the Polish market / K. Pietrak, M. Kubis, Ł. Cieslikiewicz, // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Riga, Latvia, 2019. – Volume 660. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012022>
- [292] Pimienta, L. Investigation of elastic weakening in limestone and sandstone samples from moisture adsorption / L. Pimienta, J. Fortin, Y. Guéguen // *Geophysical Journal International*. – 2014. – № 1 (199). – P. 335-347. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu257>
- [293] Pittman, E. D. Microporosity in Carbonate Rocks / E. D. Pittman // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1971. – № 10 (55). – P. 1873-1878. <https://doi.org/10.1306/819A3DB2-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- [294] Pötzl, C. Deterioration of volcanic tuff rocks from Armenia: constraints on salt crystallization and hydric expansion / C. Pötzl, S. Siegesmund, R. Dohrmann // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – № 77. – P. 1-36. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7777-8>.
- [295] Pratiwi, S. N. Diagnosis of capillary rise in heritage building / S. N. Pratiwi, P. Wijayanto, C. A. Putri // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. – Jakarta, Indonesia, 2021. – Volume 780. – P. 12076-12082. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/780/1/012076>
- [296] Přikryl, R. Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic) / R. Přikryl, L. Melounová, Z. Vařilová // *Environmental Geology*. – 2007. – № 52. – P. 409-420. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0589-2>

- [297] Přikryl, R. Durability assessment of natural stone / R. Přikryl // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 2013. – № 4 (46). – P. 377-390. <https://doi.org/10.1144/qjegh2012-052>.
- [298] Punuru, A. R. Control of porosity on durability of limestone at the great sphinx. Egypt / A. R. Punuru, A. N. Chowdhury, N. P. Kulshreshtha // Environmental Geology and Water Sciences. – 1990. – № 15. – P. 225-232. <https://doi.org/10.1007/BF01706414>
- [299] Qiu, X. Moisture transport across interfaces between autoclaved aerated concrete and mortar / X. Qiu, F. Haghighat, M. K. Kumaran // Journal of Building Physics. – 2003. – № 3 (26). – P. 213-236. <https://doi.org/10.1177/109719603032804>
- [300] Qiu, X. Study of Moisture Transport Across Interface Between Building Material / X. Qiu, F. Haghighat, M. K. Kumaran // Indoor air 2002 : Proceedings of the 9th international conference on indoor air quality and climate. – Monterey-California, 2002. – P. 776-781.
- [301] Raimondo, M. Durability of clay roofing tiles: the influence of microstructural and compositional variables // M. Raimondo, C. Ceroni, M. Dondi // Journal of the European Ceramic Society. – 2009. – № 15 (29). – P. 3121-3128. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.06.004>
- [302] Raimondo, M. Equilibrium moisture content of clay bricks: The influence of the porous structure // M. Raimondo, M. Dondi, F. Mazzanti // Building and Environment. – 2007. – № 2 (42). – P. 926-932. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.017>
- [303] Ramos Gavilán, A. B. Experimental Study of the Mechanical Behaviour of Bricks from 19th and 20th Century Buildings in the Province of Zamora (Spain) / A. B. Ramos Gavilán, M. A. Rodríguez Esteban, M. N. Antón Iglesias // Infrastructures. – 2018. – № 3. – P. 38-49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030038>
- [304] Raneri, S. Complex Pore Geometries in Natural Building Stones: An Experimental and Theoretical Approach for the Modeling of Porosity Changes in Natural, Degraded and Treated Calcarenes : Department of Biological, Geological and Environmental Sciences : Ph.D. in Earth Science / Raneri S. ; University of Catania. – Sicily, Italy, 2015. – 198 p.
- [305] Reedy, C. L. High-resolution micro-CT with 3D image analysis for porosity characterization of historic bricks / C. L. Reedy, C. L. Reedy // Heritage Science. – 2022. – № 10. – P. 83-105. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00723-4>
- [306] Rempel, A. W. Modeling relative frost weathering rates at geomorphic scales / A. W. Rempel, J. A. Marshall, J. J. Roering // Earth and Planetary Science Letters. – 2016. – № 453. – P. 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.019>
- [307] Rescic, S. On-site evaluation of the ‘mechanical’ properties of Maastricht limestone and their relationship with the physical characteristics / S. Rescic, F. Fratini, P. Tiano // Geological Society London Special Publications. – 2010. – № 331. – P. 203-207.

- [308] Rigbey, S. J. The effect of sorbed water on expansivity and durability of rock aggregates : Department of geological Engineering : A Thesis in partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of applied Science / Rigbey S. J. ; University of Windsor. – Ontario, 1980. – 185 p.
- [309] RILEM TC 127-MS : Tests for masonry materials and structures // Materials and structures. – 1996. – № 29. – P. 459-475.
- [310] Rirsch, E. Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties / E. Rirsch, Z. Zhang // Construction and Building Materials. – 2010. – № 10 (24). – P. 1815-1820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024>
- [311] Robertson, W. D. Evaluation of the durability of limestone masonry in historic buildings / W. D. Robertson // Studies in Conservation. – 1982. – № 27. – P. 51-55. <https://doi.org/10.1179/sic.1982.27.Supplement-1.51>
- [312] Robinson, G. C. The relationship between pore structure and durability of brick / G. C. Robinson // American Ceramic Society Bulletin. – 1984. – № 63. – P. 295-300.
- [313] Rodríguez-Esteban, M. A. Brick of the Historical Heritage: Comparative Analysis of The Thermal Conductivity, Density and Moisture / M. A. Rodríguez-Esteban, M. S. Camino-Olea, A. Llorente-Álvarez // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – Prague, Czech Republic, 2021. – Volume 1203. – P. 32042-32052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/3/032042>
- [314] Rodriguez-Navarro, C. Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars / C. Rodriguez-Navarro, O. Cazalla, K. Elert // Proceedings of the Royal Society London A. – London : Royal Society, 2003. – Volume 458. – P. 2261-2273. <https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0975>
- [315] Rodriguez-Navarro, C. Salt weathering: Influence of evaporation rate supersaturation and crystallization pattern / C. Rodriguez-Navarro, E. Doehne // Earth Surface Processes and Landforms. – 1999. – № 3 (3). – P. 291-209.
- [316] Rodriguez-Navarro, C. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials / C. Rodriguez-Navarro, E. Doehne, E. Sebastian // Cement and Concrete Research. – 2000. – № 10 (30). – P. 1527-1534. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00381-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00381-1).
- [317] Rogers, C. A. The effect of de-icing agents on water adsorption phenomena in rock aggregates : Department of Geology : Graduate Studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science / Rogers C. A. ; University of Windsor. – Ontario, 1977. – 137 p.
- [318] Rosina, E. San Rocco Church: A Typical Ancient Structure in Northern Italy / E. Rosina, A. Sansonetti // Materials Evaluation. – 2011. – № 1 (69). – P. 32-40.
- [319] Rossi-Manaresi, R. Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various types of stone / R. Rossi-Manaresi, A. Tucci // Studies in Conservation. – 1991. – № 1 (36). – P. 53-58. <https://doi.org/10.1179/sic.1991.36.1.53>

- [320] Ruedrich, J. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings / J. Ruedrich, T. Bartelsen, R. Dohrmann // *Environmental Earth Sciences*. – 2011. – № 63. – P. 1545-1564. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0767-0>
- [321] Ruedrich, J. Salt and ice crystallisation in porous sandstones / J. Ruedrich, S. Siegesmund // *Environmental Geology*. – 2007. – № 2 (52). – P. 225-249. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0585-6>
- [322] Ruiz-Agudo, E. Salt weathering by sulfates. Influence of saline solution properties / E, Ruiz-Agudo, C. Rodriguez-Navarro // *Macla*. – 2006. – № 6. – P. 431-434.
- [323] Russa, M. F. La. Study of the effects of salt crystallization on degradation of limestone rocks / M. F. La Russa, S. A. Ruffolo, C. M. Belfiore // *Periodico di Mineralogia*. – 2013. – № 1 (82). – P. 113-127. <https://doi.org/10.2451/2013PM0007>
- [324] Sandrolini, F. Materials decay and environmental attack in the Pio Palace at Carpi a holistic approach for historical architectural surfaces conservation / F. Sandrolini, E. Franzoni, G. Cuppini // *Building and Environment*. – 2007. – № 42. – P. 1966-1974. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.021>
- [325] Sandrolini, F. An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings / F. Sandrolini, E. Franzoni // *Building and Environment*. – 2006. – № 10 (41). – P. 1372-1380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.023>
- [326] Sandrolini, F. Repair systems for the restoration of ancient buildings – dampness rise problem / F. Sandrolini, E. Franzoni // *Restoration of Buildings and Monuments*. – 2007. – № 3 (13). – P. 161-171. <https://doi.org/10.1515/rbm-2007-6129>
- [327] Sansonetti, A. New Tools for the Protection of Cultural Heritage in Italy: Innovative Techniques for In-situ Diagnostics / A. Sansonetti, E. Rosina, N. Ludwig // *Materials Evaluation*. – 2011. – № 1 (69). – P. 41-46.
- [328] Santos, A. R. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates / A. R. Santos, M. R. Veiga, A. Santos Silva // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 187. – P. 907-922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.223>
- [329] Sardella, A. Diagnosis and methods against rising damp in industrial heritage buildings: a case study in Italy / A. Sardella, P. De Nuntiis, C. Giosuè // *IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*. – Lecce, Italy : Curran Associates, 2017. – P. 202-207.
- [330] Sawdy, A. The kinetics of salt weathering of porous materials. Stone monuments and wall paintings : Institute of Archaeology : PhD Thesis / Sawdy A. ; University College London. – 2001. – 351 p.

- [331] Schaffer, R. J. The Weathering of Natural Building Stones / R. J. Schaffer // Special report : Department of Scientific and Industrial Research. – London: HMSO, 1932. – № 18. – P. 5-40.
- [332] Scherer, G. W. Factors affecting crystallization pressure / G. W. Scherer // International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation. – Villars, Switzerland, 2002. – P. 139-154. <https://doi.org/10.1617/2912143802.009>
- [333] Scherer, G. W. Stress from crystallization of salt / G. W. Scherer // Cement and Concrete Research. – 2004. – № 9 (34). – P. 1613-1624. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.034>
- [334] Scrivano, S. Micro-porosity and minero-petrographic features influences on decay: Experimental data from four dimension stones / S. Scrivano, L. Gaggero, J. Aguilar Gisbert // Construction and Building Materials. – 2018. – № 173. – P. 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.041>
- [335] Siedel, H. Alveolar weathering of Cretaceous building sandstones on monuments in Saxony, Germany / H. Siedel // Geological Society, London, Special Publications. – 2010. – № 333. – P. 11-23. <https://doi.org/10.1144/SP333>
- [336] Skłodowski, M. Compact Diagnostic Test: outline of historical monuments testing procedure : Prace IPPT (IFTR Reports) / M. Skłodowski. ; Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences (IPPT PAN) – Warszawa, 2006. – Volume 3. – 24 p.
- [337] Skłodowski, M. Micro-cores technology for testing of historical materials / M. Skłodowski // Proceedings of the international conference and brokerage event on the construction aspects of the heritage protection, constructional aspects. – Cavtat, Croatia : Radić J., Rajčić, V., Žarnić R. (eds.), 2012. – P. 205-211.
- [338] Skłodowski, M. Quasi-non-destructive testing of historical structural materials using microcores / M. Skłodowski // Proceedings of the 5th International Conference Structural Analysis of Historical Constructions. – New Delhi : P. B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds.), 2006. – P. 860 – 865.
- [339] Skłodowski, M. Minor Destructive Testing of XVIII Century Brick Wall Using Compact Diagnostic Test CoDiT / M. Skłodowski // Advanced Materials Research. – 2010. – № 133-134. – P. 223-228. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.133-134.223>
- [340] Skłodowski M. Assessment of mechanical properties of the historical bricks of Burgos Gate in Alcala de Henares in Madrid / M. Skłodowski, M. Alvarez de Buergo, G. Barluenga // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions : SAHC2014. – Mexico City (MX), 2014. – P. 1-8. <https://doi.org/10.13140/2.1.1840.7368>.
- [341] Skłodowski, M. Micro Drill Cores – A New Tool For Testing Stones For Conservation Purposes / M. Skłodowski, R. Snethlage, M. Kocher // Proceedings of the 11th International Congress on

- Deterioration and Conservation of Stones. – Torun, Poland : J. W. Łukaszewicz & P. Niemcewicz (Eds.) : Nicolaus Copernicus University Press, 2008. – Volume 1. – P. 513-520.
- [342] Somsin, S. A study of pore size distributions in fired clay bricks in relation to salt attack resistance / S. Somsin, S. Zsembery, J. A. Ferguson // *Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference*. – Melbourne, Australia : Tom McNeilly, John C. Scrivener (eds) : Brick Development Research Institute, Department of Architecture & Building, University of Melbourne, 1985. – P. 253-260.
- [343] Stefanidou, M. Methods for porosity measurement in lime-based mortars / M. Stefanidou // *Construction and Building Materials*. – 2010. – № 12 (24). – P. 2572-2578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.019>
- [344] Steiger, M. Crystal growth in porous materials—I: the crystallization pressure of large crystals / M. Steiger // *Journal of Crystal Growth*. – 2005. – № 3-4 (282). – P. 455-469. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.05.007>
- [345] Steiger, M. Crystal growth in porous materials—II: influence of crystal size on the crystallization pressure / M. Steiger // *Journal of Crystal Growth*. – 2005. – № 3-4 (282). – P. 470-481. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.05.008>
- [346] Stepień, P. Comparative Study on Hygric Properties and Compressive Strength of Ceramic Bricks / P. Stepień, E. Spychał, K. A. Skowera // *Materials*. – 2022. – № 15 (213). – P. 7820-7836. <https://doi.org/10.3390/ma15217820>
- [347] Stryżewska, T. Microstructure of Ceramic Brick Contaminated by Magnesium Sulphate / T. Stryżewska, S. Kańka // *Advances in Science and Technology*. – 2014. – № 92. – P. 203-208. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.92.203>.
- [348] Stryżewska, T. The effects of salt crystallization in ceramic bricks in terms of line deformations / T. Stryżewska, S. Kańka // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 193. – P. 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.194>
- [349] Stryżewska, T. Forms of Damage of Bricks Subjected to Cyclic Freezing and Thawing in Actual Conditions / T. Stryżewska, S. Kańka // *Materials*. – 2009. – № 7 (12). – P. 1165-1187. <https://doi.org/10.3390/ma12071165>
- [350] Stück, H. Petrographical and petrophysical properties of sandstones: statistical analysis as an approach to predict material behaviour and construction suitability / H. Stück, R. Koch, S. Siegesmund // *Environmental Earth Sciences*. – 2013. – № 4 (69). – P. 1299-1332. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2008-1>
- [351] Stück, H. Weathering behaviour and construction suitability of dimension stones from the Drei Gleichen area (Thuringia, Germany) / H. Stück, S. Siegesmund, J. Rüdrieh // *Environmental Earth Sciences*. – 2011. – № 63. – P. 1763-1786. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1043-7>

- [352] Stull, R. T. Some Properties of the Pore System in Bricks and Their Relation to Frost Action / R. T. Stull, P. V. Johnson // Research papers RP 1349 : The National Bureau of Standards (NBS) . – 1940. – Volume 25. – 23 p.
- [353] Sugo, H. O. A study of bond strength and mortar microstructure developed using masonry cement / H. O. Sugo, A. W. Page, S. Lawrence // Proceedings of the 12th International Brick and Block Masonry Conference. – Madrid, Spain, 2000. – P. 1753-1763.
- [354] Tang, Y. Pore structure of ancient Chinese bricks under environmental vicissitudes / Y. Tang T. Xu // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2016. – № 5 (20). – P. 1895-1902. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0652-1>
- [355] Thomachot, C. Evolution of the petrophysical properties of two types of Alsatian sandstone subjected to simulated freeze-thaw conditions / C. Thomachot, D. Jeannette // Geological Society London Special Publications. – 2002. – № 1 (205). – P. 19-32. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.03>
- [356] Thomachot, C. A comparison of the properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium) / C. Thomachot, M. Gommeaux, G. Fronteau // Environmental Earth Sciences. – 2011. – № 7 (63). – P. 1447-1461. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0743-8>
- [357] Thomachot, C. Modifications of the porous network of sandstone accompanying the formation of black varnish / C. Thomachot, M. Gommeaux, G. Fronteau // Environmental Geology. – 2008. – № 56. – P. 571-582. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1443-5>
- [358] Thomson, M. L. Porosity of historic mortars / M. L. Thomson, J-E. Lindqvist, J. Elsen // 13th International Brick and Block Masonry Conference. – Amsterdam, 2004. – P. 1-10.
- [359] Thomson, M. L. Porosity of mortars / M. L. Thomson // Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair : Final Report of RILEM TC 167-COM. – 2004. – P. 77 – 106. <https://doi.org/10.1617/2912143675.006>
- [360] Tiennot, M. Influence of Clay Minerals Nature on the Hydromechanical and Fracture Behaviour of Stones / M. Tiennot, J. D. Mertz, A. Bourguès // Rock Mechanics and Rock Engineerin. – 2019. – № 52. – P. 1599-1611. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1672-1>
- [361] Topal, T. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument / T. Topal, B. Sözmen // Engineering Geology. – 2003. – № 3-4 (68). – P. 201-223. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00228-4)
- [362] Totoev, Y. Z. Experimental Identification of Moisture Transport Parameters for Brick and Mortar / Y. Z. Totoev, A. W. Page, H. O. Sugo // Proceedings of the 9th Canadian Masonry Symposium. – Fredericton, New Brunswick, Canada, 2001. – P. 1-10.

- [363] Trotman, P. Rising Damp in Walls. Diagnosis and Treatment / P. Trotman // Berkshire, United Kingdom : BRE Group, 2007. – 12 p.
- [364] Tuğrul, A. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey / A. Tuğrul // Engineering Geology. – 2004. – № 3-4 (75). – P. 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.008>
- [365] Tunkiewicz, M. Hygric Properties of Machine-Made, Historic Clay Bricks from North-Eastern Poland (Former East Prussia): Characterization and Specification for Replacement Materials / M. Tunkiewicz, J. Misiewicz, P. Sikora // Materials. – 2021. – № 14 (21). – P. 6706-6719. <https://doi.org/10.3390/ma14216706>
- [366] Vázquez, P. Comparison between petrophysical properties, durability and use of two limestones of the Paris region / P. Vázquez, B. Menéndez, M. F. C. Denecker // Geological Society Special Publication. – 2016. – № 1 (416). – P. 203-216. <https://doi.org/10.1144/SP416.15>
- [367] Vecchiattini, R. Moisture monitoring experience in the old town of Genoa (Italy) / R. Vecchiattini // Journal of Cultural Heritage. – 2018. – № 31. – P. S71–S81. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.007>
- [368] Verstrynge, E. Long-term behaviour of monumental masonry constructions: modelling and probabilistic evaluation : Faculty of Engineering : Dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Engineering Sciences / Verstrynge E. ; Katholieke Universiteit Leuven. – Leuven, Belgium, 2010. – 270 p.
- [369] Vieira, A. W. Comparison of Methods for Determining the Water Absorption of Glazed Porcelain Stoneware Ceramic Tiles / A. W. Vieira, M. D. M. Innocentini, E. Mendes // Materials Research. – 2017. – № 2 (20). – P. 637-643. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0089>
- [370] Vogel, T. Moisture regime of historical sandstone masonry – a numerical study / T. Vogel, J. Dušek, M. Dohnal // Journal of Cultural Heritage. – 2020. – № 42. – P. 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.005>
- [371] Vos, B. H. Suction of Groundwater / B. H. Vos // Studies in Conservation. – 1971. – № 4 (16). – P. 129-144. <https://doi.org/10.2307/1505493>
- [372] Walbert, C. Evolution of the mechanical behavior of limestone subjected to freeze–thaw cycles / C. Walbert, J. Eslami, A. L. Beaucour // Environmental Earth Sciences. – 2015. – № 74. – P. 6339-6351. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4658-2>
- [373] Walbert, C. Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti: étude du comportement hydromécanique : Spécialité Génie Civil : Thèse de doctorat Présentée pour l'obtention du grade de docteur / Walbert C. ; Université de Cergy-Pontoise : Ecole doctorale Science et Ingénierie. – 2015. – 188 p.

- [374] Wedekind, W. Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion / W. Wedekind, R. López-Doncel, R. Dohrmann // *Environmental Earth Sciences*. – 2013. – № 69. – P. 1203-1224. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2158-1>
- [375] Wendler, E. Water and its Interaction with Porous Inorganic Building Materials / E. Wendler, A. E. Charola // *Proceedings of Hydrophobe V: 5th International conference on water repellent treatment of building materials*. – Brussels, Belgium : Aedificatio Publishers, 2008. – P. 57-74.
- [376] Wesołowska, M. Dependence of Capillary Properties of Contemporary Clinker Bricks on Their Microstructure / M. Wesołowska, A. Kaczmarek // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2017. – № 2 (245). – P. 22045-22051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022045>
- [377] Wetzel, A. On the physical weathering of various mudrocks / A. Wetzel, G. Einsele // *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. – 1991. – № 44. – P. 89-100. <https://doi.org/10.1007/BF02602713>
- [378] Wilson, M. A. British standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation / M. A. Wilson, M. A. Carter, W. D. Hoff // *Materials and Structures*. – 1999. – № 32. – P. 571-578. <https://doi.org/10.1007/BF02480491>
- [379] Yu, S. Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones / S. Yu, C. Oguchi // *Engineering Geology*. – 2010. – № 3-4 (115). – P. 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.007>
- [380] Yuen, C. G. Flexural bond strength of clay brick masonry / C. G. Yuen, S. L. Lissel // *Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation III : WIT Transactions on Engineering Sciences*. – 2007. – № 57. – P. 253-262. <https://doi.org/10.2495/MC070251>
- [381] Yurikov, A. Sorption-Induced Deformation and Elastic Weakening of Bentheim Sandstone / A. Yurikov, M. Lebedev, G. Y. Gor // *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*. – 2018. – № 10 (123). – P. 8589-8601. <https://doi.org/10.1029/2018jb016003>
- [382] Zanelato, E. B. Evaluation of roughcast on the adhesion mechanisms of mortars on ceramic substrates / E. B. Zanelato, J. Alexandre, A. R. G. de Azevedo // *Materials and Structures*. – 2019. – № 52. – P. 53-65. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1353-x>
- [383] Zhang, J. Fractal Analysis of Pore Structure Development of Sandstone: A Nuclear Magnetic Resonance Investigation / J. Zhang, H. Deng, J. Deng // *IEEE Access*. – 2019. – № 7. – P. 47282-47293. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909782>
- [384] Zhou, X. Water uptake in masonry: effect of brick/mortar interface / X. Zhou, G. Desmarais, P. Vontobel // *Proceedings of the 7th International Building Physics Conference : Healthy, Intelligent, and Resilient Buildings and Urban Environments*. – Syracuse: International Building Physics Association, 2018. – P. 103-108. <https://doi.org/10.14305/ibpc.2018.be-2.06>

- [385] Zhou, Z. Strength characteristics of hydraulic lime mortared brickwork / Z. Zhou, P. Walker, D. D'Ayala // Proceedings of the Institution of Civil Engineers : Construction Materials. – 2008. – № 4 (161). – P. 139-146. <https://doi.org/10.1680/coma.2008.161.4.139>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Внедрение результатов диссертационной работы



Министерство культуры Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЕ НАУЧНО – РЕСТАВРАЦИОННЫЕ
ПРОЕКТНЫЕ МАСТЕРСКИЕ»
(ФГУП ЦНРПМ)**

109544, г. Москва, Школьная, 24 тел. 8 (495) 678-52-12, e-mail: info@cnrpm.ru

В диссертационный совет Д54.1.002.01
при АО «НИЦ Строительство»
по адресу: 109428, Москва,
2-ая Институтская ул, д 6.

Справка о внедрении
результатов диссертационного исследования

Настоящей справкой подтверждается, что методика исследования материалов исторических конструкций объектов культурного наследия, предложенная в диссертационном исследовании Шейкина Евгения Валерьевича, на протяжении более 15 лет применяется при исследовании температурно-влажностного режима объектов культурного наследия, в том числе: Рождественского собора Ферапонтова монастыря, Троицкого собора Антониево-Сийского монастыря, Смоленского собора Новодевичьего монастыря, церкви в селе Остров, Георгиевского собора в Касимове, башен Московского Кремля, Спасо-Преображенского собора Соловецкого монастыря, церкви Ризоположения Московского Кремля, Подземной палаты Архангельского собора Московского Кремля, Успенского собора в Рязани, Георгиевского собора в Юрьеве-Польском, Успенского собора в Смоленске, церкви Николы Мокрого в Ярославле, Троицкого собора в Яхrome, Успенского собора Княгинина монастыря во Владимире, Троице-Знаменской церкви в Лежнево, Усадьбы Лопухиных в Москве, Спасской церкви в Киово в Лобне и т.д.

Заместитель директора
ФГУП «Центральные научно-реставрационные
проектные мастерские» (ЦНРПМ)
по проектной деятельности
Ярцев И.Н.





Министерство культуры Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЕ НАУЧНО – РЕСТАВРАЦИОННЫЕ
ПРОЕКТНЫЕ МАСТЕРСКИЕ»
(ФГУП ЦНРПМ)**

109544, г. Москва, Школьная, 24 тел. 8 (495) 678-52-12, e-mail: info@cnrpm.ru

В диссертационный совет Д54.1.002.01
при АО «НИЦ Строительство»
по адресу: 109428, Москва,
2-ая Институтская ул, д 6.

Справка о внедрении
результатов диссертационного исследования

Настоящей справкой подтверждается, что методика исследования материалов исторических конструкций объектов культурного наследия, предложенная в диссертационном исследовании Шейкина Евгения Валерьевича, была использована при внесении изменений в ГОСТ Р 55567-2013 «Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия». Автором был переработан 8 раздел «Исследование температурно-влажностного режима объекта культурного наследия».

Заместитель директора
ФГУП «Центральные научно-реставрационные
проектные мастерские» (ЦНРПМ)
по проектной деятельности
Ярцев И.Н.

