



Исследование микроклимата культовых сооружений на примере Воскресенского храма в городе Курске

О.Н. Зайцев¹, В.М. Толмачева¹, Е.С. Кретьова¹, В.Ю. Амелин¹, Н.Ю. Кушнерев¹

¹Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Актуальность исследования микроклимата Воскресенского храма в Курске обусловлена необходимостью сохранения архитектурных конструкций, настенной живописи, иконостаса и других объектов церковного искусства, а также обеспечения комфортного пребывания прихожан во время богослужений. Параметры внутренней среды определяются объёмно-планировочной структурой здания, массивностью ограждающих конструкций, особенностями воздухообмена, теплотехническими характеристиками материалов и режимами эксплуатации. Существующие методики анализа микроклимата исторических сооружений не в полной мере учитывают сложные процессы тепло- и влагообмена, что ограничивает возможности точного прогнозирования динамики внутренней среды и разработки инженерных решений. Цель работы заключается в комплексном исследовании механизмов формирования температурно-влажностного и аэродинамического режимов во внутреннем пространстве храма и последующей оценке их влияния на устойчивость микроклимата и сохранность архитектурного и художественного убранства. Задачи включают анализ тепло- и влагообменных процессов в ограждающих конструкциях и воздушной среде храма, выявление зон локального увлажнения и дестабилизирующих факторов, разработку и обоснование рекомендаций по нормализации температурно-влажностного режима; предотвращение деградации объекта культурного наследия и повышение комфортности пребывания прихожан.

Результаты. Проведено инструментальное обследование микроклимата храма, включающее регистрацию температурно-влажностных параметров и диагностику ограждающих конструкций для выявления отклонений от нормативных режимов. Сформулированы рекомендации по снижению влажностной нагрузки и стабилизации внутренней среды.

Выводы. Научная новизна состоит в комплексном сопоставлении результатов натурных инструментальных исследований температурно-влажностного режима, лабораторного микроструктурного анализа строительных материалов методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализом и численного моделирования воздухообмена применительно к одному храмовому зданию, а также в сопряжении результатов натурных измерений с расчётной моделью. Выявлены пространственная неоднородность параметров микроклимата и зоны повышенной влажностной нагрузки на конструкции. Результаты использованы при разработке рекомендаций по стабилизации внутренней среды и повышению сохранности архитектурного и художественного убранства.

Ключевые слова: микроклимат, температурно-влажностный режим, воздухообмен, параметры, храм, инструментальное обследование, сохранность убранства

Для цитирования: Зайцев О.Н., Толмачева В.М., Кретьова Е.С., Амелин В.Ю., Кушнерев Н.Ю. Исследование микроклимата культовых сооружений на примере Воскресенского храма в городе Курске // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 88-99, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.6, EDN: EDFTBY

Research of the microclimate of religious buildings on the example of the Resurrection Church in the city of Kursk

O.N. Zaitsev¹, V.M. Tolmacheva¹, E.S. Kretova¹, V.Yu. Amelin¹, N.Yu. Kushnerev¹

¹South-Western State University, Kursk, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The study of the microclimate of the Resurrection Church in Kursk is an urgent scientific problem due to the need to ensure the preservation of architectural structures, wall paintings, iconostases, and other objects of church art, as well as to maintain comfortable conditions for parishioners during worship services. The formation of the internal environment parameters in a church building is determined by a combination of factors, including the volumetric and planning structure, the significant massiveness of the enclosing structures, the specific features of air exchange, the thermal characteristics of materials, and the operating conditions. Existing methods for analyzing the microclimate of historical buildings do not fully take into account the complex processes of heat and moisture exchange, which limits the ability to accurately predict the dynamics of the internal environment and develop engineering solutions. The purpose of this work is to conduct a comprehensive study of the mechanisms that determine the temperature, humidity, and aerodynamic conditions in the interior of the church, as well as to identify the factors that affect the stability of the microclimate and the preservation of the architectural and artistic decorations. The research tasks include analyzing the heat and moisture exchange processes in the enclosing structures of the church and air environment; identifying areas of local moisture and factors that destabilize the microclimate; developing and justifying recommendations for normalizing the temperature and humidity regime; preventing the degradation of the cultural heritage site and improving the comfort of the parishioners.

Results. An instrumental survey of the microclimate of the church was conducted, including the registration of temperature and humidity parameters and the diagnosis of building structures in order to identify deviations from the standard modes. Recommendations were formulated to reduce moisture load and stabilize the internal environment.

Conclusions. The scientific novelty lies in the comprehensive comparison of the results of in-situ instrumental temperature and humidity studies, laboratory microstructural analysis of building materials using scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray analysis, and numerical air exchange modeling for a single church building, as well as the integration of the in-situ measurement results with a computational model. Spatial heterogeneity in microclimate parameters and zones of increased humidity load on the structures were identified. The results were used to develop recommendations for stabilizing the internal environment and improving the preservation of architectural and decorative features.

Keywords: microclimate, temperature and humidity regime, air exchange, parameters, church, instrumental survey, preservation of decoration.

For citation: Zaitsev O.N., Tolmacheva V.M., Kretova E.S., Amelin V.Yu., Kushnerev N.Yu. Research of the microclimate of religious buildings on the example of the Resurrection Church in the city of Kursk // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 88-99, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.6, EDN: EDFTBY

1. Введение

Воскресенский храм в Курске является объектом культурного наследия, для которого устойчивость микроклимата имеет ключевое значение в обеспечении сохранности настенной живописи, иконостаса, деревянных и каменных конструкций, а также в поддержании допустимых условий пребывания прихожан. Формирование микроклимата в культовых сооружениях определяется сочетанием архитектурно-планировочных особенностей, значительной толщины ограждающих конструкций, большой высоты внутреннего объёма и нерегулярных эксплуатационных воздействий, что приводит к сложным процессам тепло- и влагообмена.

В мировой научной практике значительное внимание уделяется исследованию микроклимата исторических зданий, в частности влиянию температурно-влажностных колебаний на деградацию материалов, включая процессы растрескивания, деформации и солеобразования. В ряде фундаментальных работ показано, что даже умеренные, но регулярные колебания параметров внутренней среды способны вызывать накопительные повреждения в настенной живописи, деревянных конструкциях и пористых минеральных материалах [1–3]. Отдельное направление исследований связано с изучением механизмов влагонакопления и миграции влаги в пористых строительных материалах, а также с оценкой рисков кристаллизации солей и биоповреждений. Эти работы формируют методологическую основу для анализа влажностного состояния ограждающих конструкций и разработки подходов к снижению влажностной нагрузки [4–6]. Существенный вклад внесён в развитие методов мониторинга микроклимата, включая использование длительных серий измерений, тепловизионной диагностики, моделирования методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и численного анализа динамики влажности [8–10]. Эти исследования позволяют оценивать пространственную неоднородность параметров внутренней среды, выявлять зоны локального увлажнения и прогнозировать поведение микроклимата при различных эксплуатационных воздействиях [4]. Работы С. Bertolin [5], М. Steiger [6], Р. Fazio [7] рассматривают механизмы влагонакопления, солевых процессов и рисков повреждений. Европейские стандарты UNI 10829 [8] и EN 15757 [9] регламентируют параметры микроклимата для объектов культурного наследия, однако ориентированы преимущественно на здания с контролируруемыми инженерными системами. Исследования, посвящённые развитию методов мониторинга и численного моделирования микроклимата, включая CFD-подходы и анализ динамики влажности в пористых материалах, представлены в ряде работ [10–12], где обоснована необходимость комплексного учёта тепловлажностных процессов. Дополнительные результаты, уточняющие влияние эксплуатационных факторов на формирование микроклимата, приведены в последующих исследованиях [13].

Российская научная школа также накопила значительный опыт в области диагностики и нормализации микроклимата исторических зданий.

Значительное внимание в отечественных исследованиях уделяется оценке влажностного состояния ограждающих конструкций и теплотехнических характеристик материалов, что отражено в ряде работ [14–16]. Дополнительные результаты, связанные с анализом процессов влагонакопления и эксплуатационных факторов, представлены в последующих исследованиях [17, 18].

Существенный вклад в изучение микроклимата культовых сооружений внесён исследованиями Кочева А.В. [19–21], в которых рассматриваются особенности воздухообмена, тепловлажностного режима и эксплуатационных воздействий в православных храмах. Однако анализ большого количества отечественных и зарубежных источников показывает, что комплексных исследований, объединяющих инструментальные измерения, теплотехнический анализ, моделирование влагонакопления и оценку эксплуатационных режимов именно для храмовых зданий, практически не представлено.

Отсутствие методик, адаптированных к специфике храмовой архитектуры, затрудняет разработку инженерных решений, направленных на предотвращение деградации архитектурного убранства и обеспечение комфортных условий пребывания прихожан. Это определяет необходимость проведения комплексного исследования микроклимата Воскресенского храма в Курске, включающего инструментальные измерения, анализ тепло- и влагообменных процессов, выявление зон локального увлажнения и разработку рекомендаций по нормализации параметров внутренней среды.

Целью данной работы является комплексное исследование механизмов формирования температурно-влажностного и аэродинамического режимов во внутреннем пространстве Воскресенского храма в г. Курске с последующей оценкой их влияния на устойчивость микроклимата и сохранность архитектурного и художественного убранства.

Для достижения цели решались следующие задачи: анализ тепло- и влагообменных процессов в ограждающих конструкциях и воздушной среде храма; выявление зон

локального увлажнения и факторов, дестабилизирующих микроклимат; проведение инструментальных измерений температурно-влажностных параметров; оценка влияния эксплуатационных режимов на динамику микроклимата; оценка влияния выявленных отклонений микроклимата на сохранность настенной живописи, иконостаса и иных элементов архитектурно-художественного убранства храма; разработка рекомендаций по нормализации температурно-влажностного режима.

2. Материалы и методы

Для изучения микроклимата Воскресенского храма в г. Курске были проведены натурные, лабораторные и численные исследования. Методологическая схема включала инструментальные измерения температурно-влажностных параметров, тепловизионное обследование внутренних строительных и инженерно-технологических поверхностей помещения, обследование ограждающих конструкций, анализ воздухообмена, определение влажности строительных материалов неразрушающими методами, микроструктурный анализ проб кладки, а также использование археологических данных, полученных в ходе раскопок. Обработка полученных данных выполнялась с применением стандартных теплотехнических и статистических методов.

Для регистрации параметров внутренней среды использовались сертифицированные измерительные приборы: – цифровые термогигрометры Testo 610 (Германия) с диапазоном измерения температуры от -10 до $+50$ °C и относительной влажности от 0 до 100 %, погрешностью $\pm 0,5$ °C и ± 2 %; – инфракрасная тепловизионная камера Testo 865 с тепловой чувствительностью 0,12 °C и диапазоном измерения $-20...+280$ °C; – измерительный штатив высотой 4,0 м для послойного отбора проб воздуха; – анемометр крыльчатый Testo 417 для определения скорости воздушных потоков (диапазон 0,3–20 м/с, погрешность $\pm 0,1$ м/с). Все приборы прошли поверку в соответствии с ГОСТ 8.513–84.

Перед началом измерений выполнялась калибровка нулевой точки и проверка стабильности показаний.

Измерения температуры и относительной влажности проводились в пяти характерных зонах храма: центральный неф, алтарная часть, притвор, хоры и боковые приделы. В каждой зоне выполнялись вертикальные профили измерений на высотах 0,1; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 и 4,0 м. На каждой высоте выполнялось три повторных измерения с интервалом 2 мин для исключения случайных отклонений (рис.1).

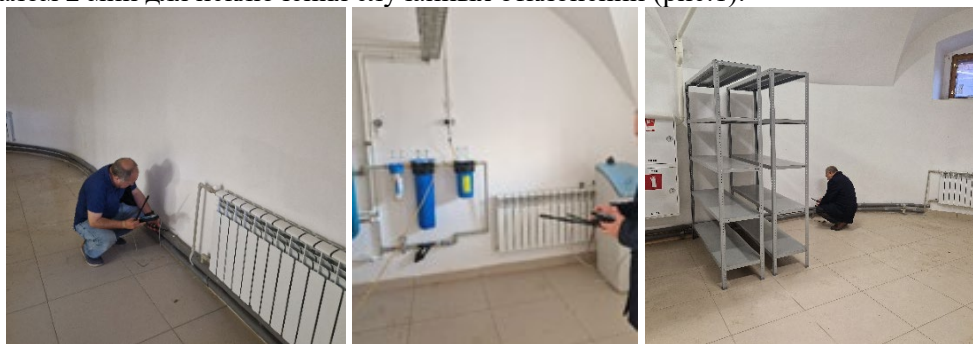


Рис. 1. Измерения температуры и относительной влажности (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Temperature and relative humidity measurements (illustration by the authors)

Тепловизионное обследование ограждающих конструкций проводилось в утренние часы при стабильной температуре наружного воздуха ($-5...-7$ °C) для выявления зон теплопотерь, мостиков холода и участков возможной конденсации влаги. Съёмка выполнялась с расстояния 3–6 м под углом 90° к поверхности. Натурные исследования воздухообмена включали точечное определение модуля скорости воздуха в 10 контрольных точках, расположенных в дверных проёмах, оконных нишах и подкупольном пространстве. Направление воздушных потоков в ходе натурных измерений отдельно не регистрировалось; направление и пространственная структура перетоков оценивались по результатам численного моделирования. Данное обстоятельство учитывалось как ограничение натурной части исследования. Тепловизионная съёмка ограждающих конструкций представлена на рис. 2.

До реставрации Воскресенского храма влажность кирпичной кладки определялась неразрушающим диэлькометрическим методом с использованием влагомера «МГ4» (СКБ «Стройприбор»). Обследование охватывало 15 контрольных участков, расположенных в подклете, на первом и втором этажах здания. Для каждого участка были зарегистрированы четыре значения влажности кирпичной кладки. Процесс выполнения измерений показан на рис. 3, результаты приведены в таблице 4.

Для уточнения состава образований, выявленных в зонах повышенного увлажнения кладки, были отобраны образцы штукатурки и кирпича. Исследование выполнялось методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX) с использованием комплекса QUANTA 200. Метод позволил определить элементный состав исследованных участков образцов. Результаты анализа представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Результаты EDX-анализа образца № 1

Элемент	Массовая доля, Wt %	Атомная доля, At %	K-Ratio
O K	46,32	66,16	0,0838
Mg K	0,20	0,19	0,0010
Al K	0,15	0,12	0,0009
Si K	2,40	1,95	0,0189
P K	0,44	0,33	0,0037
S K	17,28	12,31	0,1554
Ca K	33,21	18,93	0,3055
Итого	100	100	-

Таблица 2

Результаты EDX-анализа образца № 2

Элемент	Массовая доля, Wt %	Атомная доля, At %	K-Ratio
O K	52,07	71,11	0,0971
S K	20,22	13,78	0,1826
Ca K	27,71	15,11	0,2518
Итого	100,00	100,00	-

Таблица 3

Результаты EDX-анализа образца № 3

Элемент	Массовая доля, Wt. %	Атомная доля, At %	K -Ratio
O K	48,60	67,72	0,0948
Na K	0,77	0,75	0,0028
Mg K	0,89	0,91	0,0046
Al K	0,26	0,22	0,0017
Si K	0,20	0,16	0,0015
P K	0,56	0,41	0,0048
S K	20,40	14,18	0,1846
Ca K	28,32	15,75	0,2586
Итого	100	100	-

В таблицах 1–3 показатель Wt.% характеризует массовую долю соответствующего элемента в исследованном участке образца, At.% — атомную долю элемента. Показатель K-Ratio представляет собой отношение интенсивности характеристической рентгеновской линии элемента в исследуемом образце к интенсивности соответствующей линии эталона и используется при количественной обработке EDX-спектра.

Во всех трёх образцах основными выявленными элементами являются кислород, кальций и сера. Массовая доля кислорода составляет 46,32–52,07 %, кальция — 27,71–33,21 %, серы — 17,28–20,40 %. В образцах № 2 и № 3 атомное отношение Ca:S составляет приблизительно 1,10:1 и 1,11:1 соответственно, тогда как в образце № 1 оно равно приблизительно 1,54:1, что указывает на повышенное содержание кальция относительно серы в этом образце.

В образце № 1 дополнительно выявлены магний, алюминий, кремний и фосфор, причём наибольшая массовая доля среди них приходится на кремний — 2,40 %. В образце № 3 обнаружены натрий, магний, алюминий, кремний и фосфор, суммарная массовая доля

которых составляет 2,68 %. Совместное присутствие значительных количеств кальция, серы и кислорода позволяет предположить наличие в исследованных образцах кальций- и серосодержащих соединений, образование которых может быть связано с процессами увлажнения и последующего высыхания кладки. Вместе с тем результаты EDX-анализа характеризуют элементный, а не фазовый состав материала, поэтому без применения дополнительных минералогических методов не позволяют однозначно идентифицировать выявленные соединения как гипс, ангидрит или иную конкретную минеральную фазу.

Полученные результаты согласуются с выявленным повышенным увлажнением кладки подклета и свидетельствуют о наличии в исследованных образцах соледержащих образований. Эти данные необходимо учитывать при выборе мероприятий по осушению, очистке и восстановлению материалов нижней части здания.

Обработка данных выполнялась в программной среде Microsoft Excel. Для анализа температурно-влажностных параметров применялись: – расчёт средних значений и стандартного отклонения; – построение вертикальных и горизонтальных градиентов температуры и влажности; – сопоставление полученных данных с нормативными требованиями; – оценка риска влагонакопления по критерию точки росы и температуре поверхности конструкций. Для анализа тепловизионных изображений использовалось ПО Testo IRTSoft с последующей корректировкой коэффициента излучения ($\varepsilon = 0,92$ для штукатурки, $\varepsilon = 0,95$ для древесины).

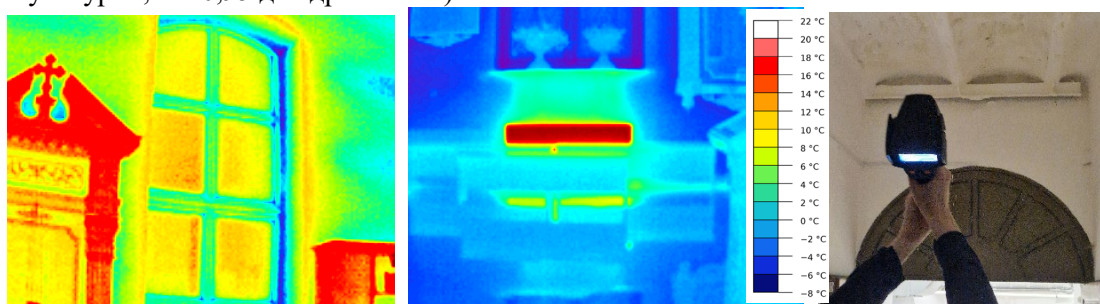


Рис. 2. Тепловизионное обследование храма с добавленной температурной легендой (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Thermal imaging survey of the church with an added temperature scale (illustration by the authors)

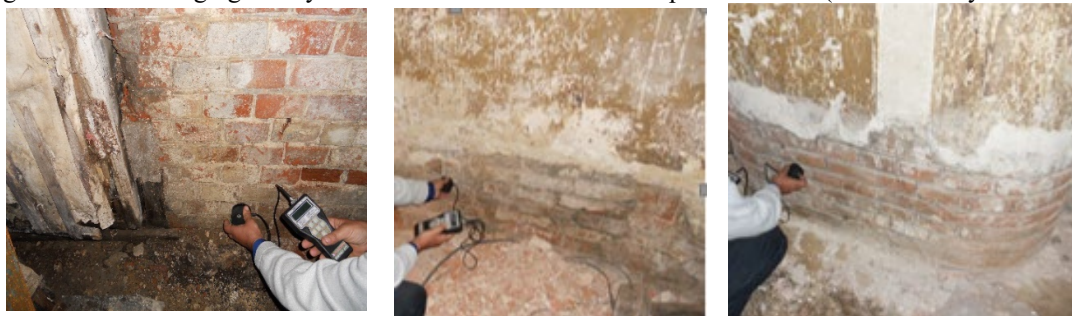


Рис. 3. Определение влажности кирпичной кладки стен Воскресенского храма с применением электронного измерителя влажности «Влагомер-МГ4» (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Determination of the brickwork moisture content of the Resurrection Church walls using the MG4 electronic moisture meter (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

Для оценки влажностного состояния кладки измерения были выполнены на 15 контрольных участках: участки № 1–5 расположены в подклете, № 6–10 — на первом этаже, № 11–15 — на втором этаже здания. На первом этаже участки измерений располагались в зоне, близкой к фундаменту, на высоте 0,2–0,6 м от уровня пола; на втором этаже высота расположения участков варьировалась. В таблице 4 для каждого участка приведены четыре зарегистрированных значения массовой влажности кирпичной кладки W_i , %, а в последнем столбце — их среднее арифметическое значение $W_{ср}$, %.

В то же время анализ распределения влажности показал, что кладка подклета и первого этажа характеризуется выраженным переувлажнением, значительно превышающим допустимые показатели. Подобная влажностная нагрузка приводит к

развитию комплекса неблагоприятных процессов: снижению прочности кирпича, вымыванию связующего, формированию солевых кристаллизаций, биоповреждениям и ускоренному разрушению декоративных покрытий [21-23]. Полученные данные свидетельствуют о том, что проблема носит системный характер и требует инженерных мер по стабилизации микроклимата и снижению влажности ограждающих конструкций.

Таблица 4

Результаты исследований по определению влажности кирпичной кладки стен
Воскресенского храма, г. Курск

№	Влажность W_i , %				W _{ср} , %
подвальное помещение					
1	14,8	31,2	7,4	28,1	20,4
2	80,4	103,8	147,8	166,8	124,7
3	23,6	12,0	4,4	2,6	10,6
4	29,1	19,7	7,3	13,8	17,5
5	28,1	19,6	11,5	7,4	16,6
1 этаж					
6	0,1	0,5	1,6	0,2	0,5
7	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
8	0,3	0,7	1,0	2,1	1,0
9	10,4	16,2	29,1	4,2	15,0
10	18,2	10,8	8,7	3,1	10,2
2 этаж					
11	0	0	0	0,3	0,1
12	0,1	0,1	0	0,3	0,1
13	0,3	0,4	0,1	0,3	0,3
14	0,4	0,2	0,6	0,2	0,3
15	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3

При дальнейшем развитии такие процессы могут негативно сказаться как на долговечности строительных конструкций, так и на санитарно-гигиенических условиях эксплуатации здания. В связи с этим мероприятия по восстановлению и защите ограждающих конструкций должны сопровождаться модернизацией систем регулирования микроклимата [24-25, 28-29]. Приоритет следует отдавать современным, энергоэффективным и экономически обоснованным техническим решениям, обеспечивающим устойчивое снижение влажностной нагрузки [30].

После выполнения работ по реконструкции храма, включая удаление культурного слоя, 7 августа 2025 года были проведены летние измерения параметров микроклимата в подклетных помещениях и на первом этаже здания. На момент обследования температура наружного воздуха составляла 26,1 °С, относительная влажность — 62,5 %, скорость ветра — 1,2 м/с, направление ветра — юго-западное. Обобщённые результаты измерений представлены в таблице 5.

Таблица 5

Показатели микроклимата Воскресенского храма, г. Курск, по результатам летних измерений 07.08.2025 г.

Помещение / зона	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость воздуха, м/с
Подклет, центр алтаря	22,3–22,4	66,0–67,0	0,05–0,12
Подклет, у стены алтаря	22,3–22,4	66,4–67,0	0,01–0,05
Подклет, запад (у стены)	23,5–23,7	62,0–63,5	0,11–0,23
Подклет, запад (центр)	23,9–24,0	63,0–63,7	0,10–0,18
Подклет, север (центр)	22,9	58,3–59,7	0,05–0,20
Подклет, север (у стены)	22,9	60,8–63,2	0,01–0,11
Подклет, юг (центр)	25,5–25,8	63,2–63,6	0,16–0,31
Подклет, юг (у стены)	23,7	63,0–63,3	0,16–0,31
Подклет, центральная часть	22,8–23,1	59,8–63,1	0,10–0,30
1-й этаж	25,7–26,3	48,7–50,4	0,10

Примечание. Параметры наружного воздуха на момент измерений: температура — 26,1 °С; относительная влажность — 62,5 %; скорость ветра — 1,2 м/с; направление ветра — юго-западное.

По данным таблицы 5, температура воздуха в подклетных помещениях составляла 22,3–25,8 °С, относительная влажность — 58,3–67,0 %, скорость движения воздуха — 0,01–0,31 м/с. Минимальная температура зафиксирована в алтарной части подклета и составляла 22,3 °С, максимальная — в центре южной части подклета и составляла 25,8 °С. Наибольшая относительная влажность отмечена в алтарной части подклета — до 67,0 %, наименьшая — в центре северной части — 58,3 %.

На первом этаже температура воздуха находилась в диапазоне 25,7–26,3 °С, относительная влажность — 48,7–50,4 %, скорость движения воздуха составляла около 0,10 м/с. Таким образом, относительная влажность в обследованных зонах подклета превышала значения первого этажа на 7,9–18,3 процентного пункта. Полученная разница указывает на выраженную неоднородность влажностного режима здания и концентрацию повышенной влажностной нагрузки в подклетной части.

Распределение скорости воздуха также являлось неоднородным. Наименьшие значения — 0,01–0,05 м/с — зарегистрированы у стены алтаря и на отдельных участках у северной стены, тогда как в южной и центральной частях подклета скорость достигала 0,30–0,31 м/с. Низкие значения скорости в пристенных участках характеризуют слабое движение воздуха и возможность формирования локальных застойных зон. Вместе с тем результаты разового обследования не позволяют количественно оценить изменение микроклимата относительно периода до реконструкции или сделать окончательный вывод об эффективности отдельных ремонтных мероприятий. Для такой оценки необходимы сопоставимые измерения в разные периоды и при различных параметрах наружного воздуха.

Для качественной интерпретации пространственной структуры воздухообмена использована трёхмерная модель внутреннего объёма Воскресенского храма. В модели воспроизведены основные объёмно-планировочные элементы здания, включая наружные стены, внутренние перегородки и проёмы. Модель применялась как вспомогательный инструмент для визуализации возможных траекторий движения воздуха и выявления участков, в которых геометрия помещения может способствовать замедлению воздухообмена.

Результаты натурных измерений использовались для сопоставления с моделью по характерным зонам и диапазонам параметров, приведённым в таблице 5. Поскольку точки натурных измерений были распределены неравномерно, а направление скорости воздуха отдельно не регистрировалось, измеренные значения не использовались как точечные векторные граничные условия. Сопоставление выполнялось на качественном уровне с учётом диапазонов скорости воздуха, зафиксированных в соответствующих частях здания. Такое представление не отражает локальных изменений параметров между точками измерений и вносит неопределённость в интерпретацию отдельных траекторий.

Состояние открывания и воздухопроницаемость всех наружных проёмов в ходе натурального обследования инструментально не определялись. Поэтому проёмы учитывались в обобщённом виде как возможные участки притока и удаления воздуха, а зарегистрированные направление и скорость наружного ветра принимались во внимание при качественной интерпретации движения потоков. Инфильтрация через неплотности оконных и дверных заполнений, локальное распределение ветрового давления, теплопередача через остекление и перенос водяного пара отдельно не рассчитывались. В связи с этим модель не использовалась для определения абсолютного расхода воздуха, точной кратности воздухообмена или пространственного распределения относительной влажности.

Храм представляет собой высокое объёмное сооружение с несколькими ярусами окон и массивными стенами, что способствует формированию выраженных вертикальных конвективных потоков. На циркуляцию воздуха влияют: многоярусная система окон, наличие подклета с иным микроклиматом, высокая тепловая инерция стен, локальные источники тепла (отопление, свечи, люди) и ограниченные пути естественной вытяжки.

Основой движения воздуха является естественная конвекция. Отопительные приборы создают восходящие струи, которые поднимаются вдоль стен, проходят через ярусы окон и накапливаются в подкупольной зоне. Охлаждённый воздух медленно опускается в центральную часть помещения. При отсутствии вытяжки через барабан или верхние окна циркуляция в нижних слоях ослабевает.

Дополнительные тепловые потоки формируются от свечей, людей и осветительных приборов. Взаимодействие этих потоков приводит к переносу сажи вверх по стенам, что представляет опасность для настенной живописи и икон.

Подклет отличается более низкой температурой, повышенной влажностью и слабой вентиляцией. Разница температур между подклетом и основным объёмом вызывает локальные циркуляционные петли, усиливающие стратификацию микроклимата.

По результатам натурных измерений скорость воздуха в обследованных зонах подклета составляла 0,01–0,31 м/с. Наименьшие значения — 0,01–0,05 м/с — зарегистрированы у стены алтаря и на отдельных участках у северной стены. В южной и центральной частях подклета скорость достигала 0,30–0,31 м/с. Полученные данные показывают, что интенсивность движения воздуха существенно различается в зависимости от расположения участка и геометрии окружающего пространства.

Представленная на рис. 5 трёхмерная модель иллюстрирует возможную пространственную структуру движения воздуха, включая формирование локальных траекторий вблизи проёмов, стен и внутренних перегородок. При этом рисунок не является количественной картой скорости: длина, плотность и цвет изображённых линий не используются для определения численных значений. Количественная характеристика движения воздуха приводится по результатам натурных измерений в таблице 5. Отсутствие натурной регистрации направлений воздушных потоков и неравномерное расположение контрольных точек не позволяют выполнить независимую количественную проверку каждой изображённой траектории. Поэтому сопоставление модели с натурными данными ограничено оценкой общей согласованности пространственной картины с выявленными зонами слабого и более интенсивного движения воздуха. Статистические показатели точности модели в настоящей работе не рассчитывались.

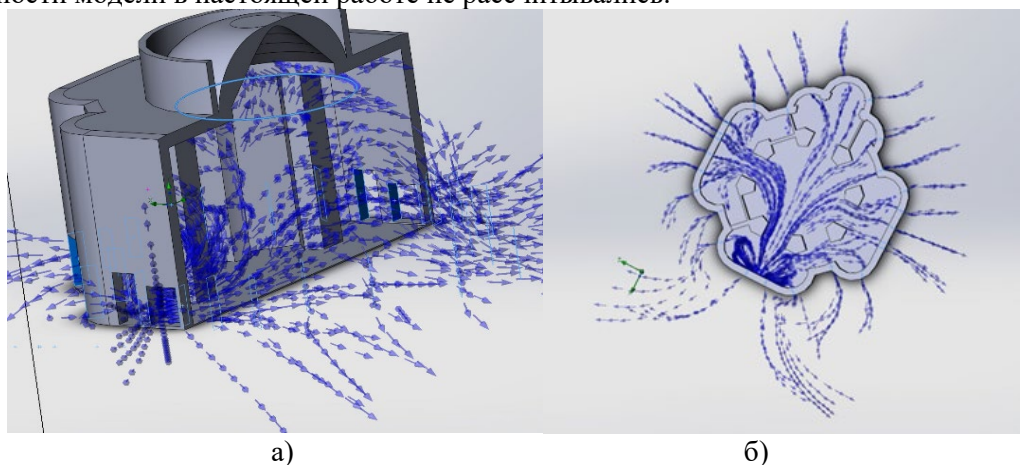


Рис. 5. Качественная визуализация возможных траекторий движения воздушных потоков во внутреннем объёме Воскресенского храма: виды сверху и в аксонометрии (иллюстрация авторов)
Fig. 5. Qualitative visualization of possible airflow trajectories inside the Resurrection Church: top and axonometric views (illustration by the authors)

Возможное формирование представленных на рис. 5 траекторий связано с конфигурацией наружных и внутренних проёмов, наличием перегородок, различием высоты отдельных частей помещения и ограниченностью путей естественного воздухообмена. Эти факторы способны приводить к отклонению потока от прямолинейного движения, возникновению локальных циркуляционных участков и снижению скорости воздуха в зонах, частично изолированных от основных путей притока и удаления воздуха.

Практическое значение модели состоит в предварительном выявлении участков, требующих более детального инструментального обследования. К ним относятся

пристенные зоны, угловые участки, пространства за внутренними перегородками и другие области, в которых натурными измерениями зафиксированы низкие значения скорости воздуха. Такая визуализация может использоваться при выборе дополнительных точек мониторинга и предварительном определении участков возможного размещения вентиляционных элементов, однако окончательные инженерные решения должны основываться на дополнительных измерениях и расчётах.

Пространственное распределение относительной влажности в рамках данной модели отдельно не рассчитывалось. Выводы о влажностном состоянии помещений и конструкций сформулированы по результатам натурных измерений воздуха, измерений влажности кирпичной кладки и лабораторного EDX-анализа образцов. Поэтому модель движения воздуха не рассматривается как самостоятельное доказательство расположения зон повышенной влажности.

4. Заключение

Исследование Воскресенского храма в Курске выявило пространственную неоднородность температурно-влажностного режима и влажностного состояния ограждающих конструкций. Повышенное увлажнение кладки сосредоточено преимущественно в подклете и на отдельных участках первого этажа. При обследовании 7 августа 2025 года относительная влажность воздуха в подклете составляла 58,3–67,0 %, на первом этаже — 48,7–50,4 %. Низкие скорости движения воздуха в отдельных пристенных участках указывают на возможность формирования зон ослабленной циркуляции.

Лабораторный энергодисперсионный рентгеновский микроанализ выявил преобладание кислорода, кальция и серы в исследованных образцах; конкретный фазовый состав образований не установлен. Трёхмерная модель использована для качественной интерпретации возможных траекторий воздушных потоков.

Для нормализации микроклимата рекомендованы устранение источников увлажнения, влагозащита подклета, устранение дефектов ограждающих конструкций, ремонт кровли, совершенствование водоотведения, постоянный мониторинг микроклимата и биологическое обследование живописи и конструкций. Выбор вентиляционных мероприятий и разработка регламента проветривания требуют дополнительного обследования воздухообмена. Реализацию комплекса мер следует осуществлять с участием профильных специалистов под руководством архитектора, ответственного за объект культурного наследия.

Список литературы / References

1. Camuffo D. Microclimate for Cultural Heritage. - Amsterdam: Elsevier, 2019. - 548 p.
2. Camuffo D., Pagan E. Indoor microclimate and artworks // *Environmental Science*. - 2018. - Vol. 12. - P. 45–62.
3. Bratasz Ł. Damage functions for painted wood under climate fluctuations // *Heritage Science*. - 2020. - Vol. 8. - P. 1–12. DOI: 10.1186/s40494-020-00402-6
4. Bertolin C. Preservation of cultural heritage: climate risk // *Climate Research*. - 2019. - Vol. 78. - P. 1–14.
5. Silva H., Henriques F. Long-term microclimate monitoring in heritage buildings: new approaches // *Energy and Buildings*. - 2021. - Vol. 252. - P. 111–125. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111125
6. Lucchi E. Environmental risk assessment in heritage buildings // *Sustainability*. - 2018. - Vol. 10. - P. 1–22. DOI: 10.3390/su10020408
7. Ferreira T., Delgado J. Moisture transport in porous building materials: updated modelling approaches // *Journal of Building Physics*. - 2022. - Vol. 45. - P. 987–1005. DOI: 10.1177/17442591211056789
8. Fabbri K., Mazzone A., Zanfini P. Impacts of heatwaves on indoor microclimate of heritage buildings // *Sustainability*. - 2026. - Vol. 18(2). - P. 842. DOI: 10.3390/su18020842
9. Boeri A., Fabbri K., Longo D. Indoor microclimate monitoring optimization in heritage buildings // *Buildings*. - 2025. - Vol. 15(17). - P. 3235. DOI: 10.3390/buildings15173235
10. Pereira L., Saraiva N., Soares N. Hygrothermal behavior of heritage buildings under climate change // *Applied Sciences*. - 2023. - Vol. 13. - P. 3445. DOI: 10.3390/app13063445

11. Pretelli M., Ugolini A., Favaretto G., Melandri E., De Vivo M.A. Preserving Nationwide Ancient and Modern Built Heritage: Microclimate and Conservation // *Architecture, Engineering and Design for Monuments Safeguarding. AID Monuments 2025* / eds. V. Gusella, M. Gioffrè, F. Cluni, N. Cavalagli, G. Milani. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 806. Cham: Springer, 2026. P. 248–259. DOI: 10.1007/978-3-032-15387-6_18.
12. Fatorić S., Seekamp E. Adaptive strategies for climate-resilient cultural heritage // *Climate Risk Management*. - 2021. - Vol. 32. - P. 100–118. DOI: 10.1016/j.crm.2021.100318
13. Camuffo D. Indoor microclimate and preventive conservation: updated review // *Heritage Science*. - 2020. - Vol. 8. - P. 1–20. DOI: 10.1186/s40494-020-00401-7
14. Кочев А.В. Исследование микроклимата православных храмов // *Вестник строительства*. - 2019. - № 4. - С. 55–62.
Kochev A.V. Study of the microclimate of Orthodox churches // *Bulletin of Construction*. - 2019. - No. 4. - P. 55–62.
15. Кочев А.В. Воздухообмен в культовых зданиях // *Строительная физика*. 2020. № 2. - С. 33–41.
Kochev A.V. Air exchange in religious buildings // *Building Physics*. 2020. No. 2. P. 33–41.
16. Кочев А.В. Тепловлажностные процессы в храмах // *Архитектура и строительство России*. - 2021. - № 7. - С. 48–54.
Kochev A.V. Heat and moisture processes in churches // *Architecture and Construction of Russia*. - 2021. - No. 7. - P. 48–54.
17. Костин С.В. Диагностика микроклимата зданий культурного наследия // *Известия МГСУ*. - 2020. - № 5. - С. 112–120.
Kostin S.V. Diagnostics of the microclimate of cultural heritage buildings // *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. - 2020. - No. 5. - P. 112–120.
18. Киселёва Н.В. Влияние влажности на долговечность строительных материалов // *Строительные материалы*. - 2019. - № 6. - С. 14–19.
Kiseleva N.V. Influence of humidity on the durability of building materials // *Construction Materials*. - 2019. - No. 6. - P. 14–19.
19. Баранова И.В. Микроклимат храмовых сооружений // *Вестник КГУ*. - 2021. - № 3. - С. 101–108.
Baranova I.V. Microclimate of church buildings // *Bulletin of Kursk State University*. - 2021. - No. 3. - P. 101–108.
20. Кретова В.М. Современные отделочные материалы для реставрации культовых сооружений // *Известия ЮЗГУ. Техника и технологии*. - 2021. - № 4. - С. 88–95.
Kretova V.M. Modern finishing materials for the restoration of religious buildings // *Proceedings of Southwest State University. Engineering and Technologies*. - 2021. - No. 4. - P. 88–95.
21. Логинов А.В. Влажностный режим исторических зданий // *Строительная физика и теплофизика*. - 2018. - № 4. - С. 77–84.
Loginov A.V. Moisture regime of historical buildings // *Building Physics and Heat Engineering*. - 2018. - No. 4. - P. 77–84.
22. Гончаров В.А. Теплотехническая оценка ограждающих конструкций памятников архитектуры в условиях изменяющегося климата // *Архитектура и строительство*. - 2022. - № 3. - С. 59–67.
Goncharov V.A. Thermal engineering assessment of enclosing structures of architectural monuments under changing climate conditions // *Architecture and Construction*. - 2022. - No. 3. - P. 59–67.
23. Иванов П.А., Сидоров М.В. Влагонакопление в кирпичных стенах исторических зданий // *Строительные конструкции*. - 2022. - № 3. - С. 88–97.
Ivanov P.A., Sidorov M.V. Moisture accumulation in brick walls of historical buildings // *Structural Engineering*. - 2022. - No. 3. - P. 88–97.
24. Мельников А.В. Теплотехнический анализ храмовых сооружений // *Инженерно-строительный журнал*. - 2023. - № 4. - С. 55–66.

- Melnikov A.V. Thermal engineering analysis of church buildings // Civil Engineering Journal. - 2023. - No. 4. - P. 55–66.
25. Орлова Е.С. Биоповреждения настенной живописи в условиях повышенной влажности // Архитектура и дизайн. - 2021. - № 2. - С. 41–49.
Orlova E.S. Biodeterioration of wall paintings under high humidity conditions // Architecture and Design. - 2021. - No. 2. - P. 41–49.
26. Сафронов И.Ю. Оценка эффективности вентиляции в зданиях культурного наследия // Строительная физика. - 2024. - № 1. - С. 23–31.
Safronov I.Yu. Evaluation of ventilation efficiency in cultural heritage buildings // Building Physics. - 2024. - No. 1. - P. 23–31.
27. Чернышев А.А. CFD-моделирование воздухообмена в помещениях сложной архитектуры // Инженерные системы. - 2025. - № 2. - С. 14–22.
Chernyshev A.A. CFD modelling of air exchange in rooms with complex architecture // Engineering Systems. - 2025. - No. 2. - P. 14–22.
28. Oikonomou D., Tsoutsos T. Energy and microclimate management in historic buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2020. - Vol. 134. - P. 110–118. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110118
29. Martínez-Garrido M.I., Fort R. Moisture transport in historical masonry // Construction and Building Materials. - 2021. - Vol. 270. - P. 121–135. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121135
30. Fabbri K. Indoor microclimate and conservation of cultural heritage // Heritage. - 2022. - Vol. 5. - P. 1234–1251. DOI: 10.3390/heritage5030067

Информация об авторах

Зайцев Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

E-mail: zon0719@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9084-9355

Толмачева Валерия Михайловна, кандидат биологических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

E-mail: 325573@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5201-4098

Кретьева Елена Сергеевна, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

E-mail: elena1480k@yandex.ru

Амелин Василий Юрьевич, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

E-mail: amelin-46@yandex.ru

Кушнерев Николай Юрьевич, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

E-mail: milord@vk.com

Information about the authors

Oleg N. Zaitsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, South-Western State University, Kursk, Russian Federation

E-mail: zon0719@yandex.ru ORCID: 0000-0001-9084-9355

Valeria M. Tolmacheva, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, South-Western State University, Kursk, Russian Federation

E-mail: 325573@mail.ru ORCID: 0000-0002-5201-4098

Elena S. Kretova, South-Western State University, Kursk, Russian Federation

E-mail: elena1480k@yandex.ru

Vasily Yu. Amelin, South-Western State University, Kursk, Russian Federation

E-mail: amelin-46@yandex.ru

Nikolay Yu. Kushnerev, South-Western State University, Kursk, Russian Federation

E-mail: milord@vk.com

Дата поступления: 15.05.2026

Дата принятия: 28.09.2026