

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИКРОКЛИМАТА С ЦЕЛЬЮ СОХРАНЕНИЯ НЕОТАПЛИВАЕМЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ: НА ПРИМЕРЕ МАВЗОЛЕЯ ХОДЖИ АХМЕДА ЯССАУИ

И. М. НУРМАГАМБЕТОВ¹, К. К. АЛИМОВА²

(Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан)

¹ORCID <https://orcid.org/0009-0007-8798-0484>;

²ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8267-142X>

Р. Ж. ШАРИПОВ

(Казахстанско-Немецкий университет, Алматы, Казахстан)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0685-8388>

В работе исследуются особенности формирования оптимального микроклимата в условиях эксплуатации неотапливаемого исторического сооружения – мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи, объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО. Проведён комплексный мониторинг температурно-влажностных параметров в ключевых зонах сооружения, выявлены критические периоды и условия, способствующие конденсации влаги и деградации отделочных материалов. Особое внимание уделено сохранности гипсового декора, уязвимого к влагонакоплению, кристаллизации солей и температурным перепадам. На основе полученных данных предложены инженерно-технические и организационные меры по стабилизации микроклимата, включающие развитие систем онлайн-мониторинга, регулируемой вентиляции, локального осушения и подогрева воздуха, с учётом аутентичности памятника и климатических особенностей Южного Казахстана. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки универсальных подходов к сохранению неотапливаемых архитектурных объектов в условиях резко континентального климата и могут быть использованы при формировании нормативных требований в области микроклиматической безопасности памятников.

Ключевые слова: *памятник архитектуры, микроклимат, мавзолей Ходжи Ахмеда Яссауи, температурно-влажностный режим, гипсовый декор, вентиляция, конденсат, мониторинг, сохранение культурного наследия, инженерные решения.*

FEATURES OF CREATING AN OPTIMAL MICROCLIMATE FOR THE PRESERVATION OF UNHEATED HISTORICAL BUILDINGS: USING THE EXAMPLE OF THE MAUSOLEUM OF KHOJA AHMED YASSAWI

I. NURMAGAMBETOV, K. ALIMOVA

*(Kazakh National Research Technical University
named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan)*

R. SHARIPOV

(Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan)

This paper examines the characteristics of creating an optimal microclimate in the operating conditions of an unheated historical building – the mausoleum of Khoja Ahmed

Yassawi, a UNESCO World Heritage Site. Comprehensive monitoring of temperature and humidity parameters in key areas of the building was carried out, and critical periods and conditions contributing to moisture condensation and degradation of finishing materials were identified. Particular attention was paid to the preservation of plaster decorations, which are vulnerable to moisture accumulation, salt crystallisation and temperature fluctuations. Based on the data obtained, engineering, technical and organisational measures were proposed to stabilise the microclimate, including the development of online monitoring systems, controlled ventilation, local dehumidification and air heating, taking into account the authenticity of the monument and the climatic characteristics of Southern Kazakhstan. The results obtained are of practical importance for the development of universal approaches to the preservation of unheated architectural objects in a sharply continental climate and can be used in the formation of regulatory requirements in the field of microclimatic safety of monuments.

Keywords: architectural monument, microclimate, Khoja Ahmed Yasawi mausoleum, temperature and humidity regime, plaster decoration, ventilation, condensation, monitoring, cultural heritage preservation, engineering solutions.

Мавзолей Ходжи Ахмеда Яссауи, возведённый в XIV веке в городе Туркестан, является выдающимся памятником средневековой архитектуры, включённым в Список всемирного наследия ЮНЕСКО. Сооружение отличается монументальностью, массивными кирпичными стенами, сложной системой перекрытий и купольных конструкций, а также уникальным гипсовым декором, сохранившимся со времён Тимуридов и не имеющим аналогов в регионе.

Эксплуатация памятника сопряжена с рядом проблем, ключевыми из которых являются отсутствие системы отопления и воздействие экстремальных климатических колебаний, характерных для южных регионов Казахстана [4; 5]. Резко континентальный климат Туркестана отличается значительными сезонными и суточными перепадами температуры и влажности [7; 8], что в условиях отсутствия искусственного климат-контроля приводит к ускоренной деградации строительных материалов и декоративных элементов. Особенно уязвимыми являются гипсовые сталактиты и отделка, для которых характерны процессы влагонакопления, конденсации и кристаллизации солей [5]. Колебания температуры и влажности напрямую влияют на физическую и химическую стабильность этих материалов. Результаты недавних исследований указывают, что наибольшая опасность разрушения наблюдается в элементах декора, расположенных в межкупольных пространствах и под центральным куполом Казандык.

Таким образом, задача поддержания оптимального микроклимата внутри мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи является не только локальной проблемой сохранения конкретного объекта, но и важной составляющей формирования универсальных методических подходов к защите неотапливаемых исторических сооружений.

Цель работы – выявление критических параметров температурно-влажностного режима, определяющих риск разрушения строительных материалов, анализ их влияния на состояние отделки и формулирование инженерно-технических мер, направленных на стабилизацию микроклимата без ущерба для аутентичности памятника.

Город Туркестан расположен в зоне резко континентального климата, характеризующегося значительными сезонными и суточными колебаниями температур,

низкой относительной влажностью воздуха в зимний период и высокими летними температурами. Продолжительность климатической зимы в регионе превышает четыре месяца [1]. Абсолютный минимум температуры может достигать -30°C , тогда как летом значения превышают $+40^{\circ}\text{C}$.

Такие экстремальные климатические условия оказывают существенное влияние на микроклимат внутри мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи. Тепловая инерция массивных кирпичных стен и перекрытий, в сочетании с естественной вентиляцией и эффектами сквозняков, приводит к неравномерному распределению температурных и влажностных полей по объёму сооружения [3]. Особенно уязвимыми к этим изменениям являются гипсовые сталактиты и элементы отделки, чувствительные к влагонакоплению и процессам кристаллизации солей [5]. Наблюдения показывают, что в весенний период, при активном прогреве наружных поверхностей и низких температурах внутри, возникает конденсация влаги, что повышает риск повреждения декоративных элементов.

В 2023–2024 гг. в рамках комплексных научно-исследовательских работ по сохранению мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи была организована система долговременного мониторинга температурно-влажностного режима. Целью мониторинга являлось выявление сезонных и суточных колебаний микроклиматических параметров, определение зон с наибольшим риском влагонакопления и оценка воздействия климатических факторов на состояние строительных материалов. Измерения проводились в ключевых зонах сооружения: подкупольное пространство Казандыка; галереи и переходы; входные порталы; помещения с гипсовыми сталактитами (рисунок 1).

Для сбора данных использовались автоматизированные датчики, фиксирующие температуру воздуха, относительную влажность, плотность теплового потока на поверхностях конструкций, скорость и направление движения воздуха [2; 3]. Датчики были размещены на разных высотных уровнях – в верхних и нижних слоях помещений, что позволило выявить вертикальный градиент температуры и влажности. Регистрация данных велась в непрерывном режиме, с последующей обработкой и сравнением показателей с нормативными и целевыми значениями.

Обработка данных, полученных в ходе круглогодичного мониторинга, позволила выделить три ключевых периода, оказывающих наибольшее влияние на сохранность отделочных материалов мавзолея:

1) февраль – март (высокий риск конденсации). В этот период резкие перепады наружной температуры сопровождаются началом прогрева купольных конструкций. При этом относительная влажность воздуха внутри достигает 80–90%. Разница между среднесуточной температурой точки росы и температурой поверхности составляет $2-3^{\circ}\text{C}$, что создаёт условия для конденсации влаги. Наблюдения показали образование капельной влаги на гипсовых элементах декора, особенно в зонах с ограниченной вентиляцией [5];

2) летний период (интенсивное иссушение материалов). Внутренняя температура поднимается до $+30^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность снижается ниже 30%. Это приводит к ускоренному испарению влаги из пористых материалов, усадке и образованию микротрещин. Разность между температурой точки росы и температурой поверхности в среднем составляет $12-17^{\circ}\text{C}$, что полностью исключает выпадение конденсата. При этом анализ воздуха, выходящего через зенитное отверстие купола, показал, что температура точки росы лишь на $5-7^{\circ}\text{C}$ ниже температуры поверхности, что также не создаёт условий для конденсации;

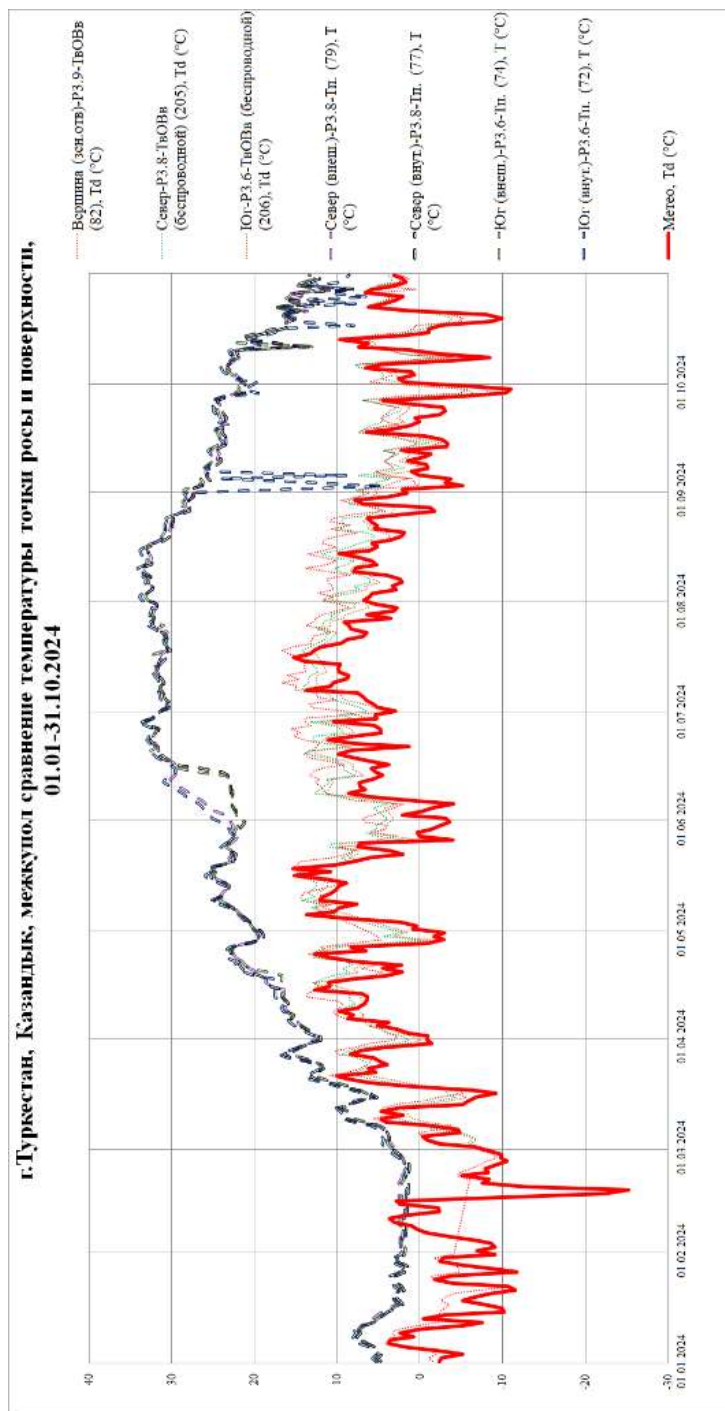


Рисунок 1. – Годовой график температур точки росы воздуха и температур поверхности купола «Казандык» мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи

3) осенний период (повышенный риск влагонакопления). Постепенное увеличение влажности воздуха при недостаточном прогреве внутренних поверхностей приводит к длительному нахождению конструкций в зоне, близкой к точке росы. Это способствует медленному, но устойчивому влагонакоплению в пористых материалах, что в перспективе может вызывать кристаллизацию солей и отслаивание отделки (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Состояние декоративного купола «Казандык»
мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи на 2024 год**

В целом, анализ предварительно обработанных данных системы мониторинга показал, что наиболее опасным для сохранности гипсового декора является позднелетне-весенний переходный период, когда сочетание повышенной влажности и малой разницы температур между поверхностью и точкой росы создаёт условия для образования конденсата в значительной части внутренних объёмов мавзолея.

Гипс, широко применённый в декоративных элементах мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи, относится к материалам с высокой гигроскопичностью. Это означает, что он активно поглощает влагу из воздуха и реагирует на изменения относительной влажности, что делает его крайне уязвимым к колебаниям микроклиматических параметров. При отрицательных температурах влага, накопленная в порах гипса, замерзает и расширяется, создавая внутренние напряжения. Этот процесс вызывает шелушение, растрескивание и постепенное осыпание отделки. Повторяющиеся циклы увлажнения и замораживания усиливают деструктивный эффект. Дополнительным фактором разрушения являются солевые отложения, образующиеся в результате капиллярного подъёма влаги из основания конструкций. При испарении влаги соли кристаллизуются в порах материала, что приводит к внутренним механическим напряжениям и ускоренному разрушению декоративных элементов [6].

Полевые наблюдения показали, что наибольшие повреждения гипсового декора фиксируются в зонах купольного пространства, особенно в местах с неравномерной вентиляцией и локализованными воздушными потоками. Здесь перепады температур и влажности наиболее выражены, а воздействие конденсации влаги – более интенсивно (см. рисунок 2).

Таким образом, сохранность гипсового декора напрямую зависит от стабильности микроклиматических условий и требует системного подхода к контролю влажности и предотвращению конденсации в уязвимых зонах. Сохранение отделочных материалов мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи в условиях его экскурсионного и культового использования требует реализации комплекса инженерно-технических и организационных мер, направленных на стабилизацию микроклимата и минимизацию негативного воздействия климатических факторов.

Предлагаемые мероприятия включают:

1) создание и внедрение системы онлайн-мониторинга микроклиматических параметров в ключевых зонах памятника. Система должна включать датчики температуры, относительной влажности, тепловых потоков и скорости движения воздуха, установленные в верхних и нижних слоях помещений. (Этап выполнен с участием авторов статьи в 2023–2024 гг.);

2) ретроспективный анализ данных мониторинга для выявления зон с критическими превышениями относительной влажности и установления временных интервалов повышенного риска образования конденсата. (Этап выполнен с участием авторов исследования в 2023–2024 гг.);

3) разработка системы регулируемой вентиляции на основе оптимизации естественного воздухообмена и интеграции элементов принудительной вентиляции в зонах, где естественная циркуляция воздуха недостаточна;

4) локальное осушение воздуха в помещениях с повышенной влажностью с использованием переносных или стационарных осушителей, настроенных на поддержание целевых значений микроклимата;

5) создание зон локального подогрева воздуха в стратегически важных точках (например, в межкупольных пространствах), что позволит повысить эффек-

тивность естественной вентиляции за счёт конвекционных потоков и предотвратить выпадение конденсата.

Реализация мероприятий, перечисленных в пунктах 3–5, требует разработки и внедрения специализированного программного обеспечения, интегрированного с системой мониторинга. Это ПО должно обеспечивать:

- получение в режиме реального времени комплексных параметров, характеризующих температурно-влажностное состояние внутренних помещений;
- сравнение фактических показателей с установленными целевыми значениями;
- автоматическую выдачу рекомендаций или управляющих сигналов для систем вентиляции, осушения и подогрева.

Применение такого подхода позволит создать адаптивную микроклиматическую систему, способную оперативно реагировать на внешние климатические изменения, сохраняя при этом аутентичность архитектурного облика памятника.

Проведённое исследование микроклимата мавзолея Ходжи Ахмеда Яссауи позволило выявить ключевые факторы, определяющие сохранность его отделочных материалов, и подтвердило критическую необходимость комплексного подхода к управлению внутренними климатическими условиями.

Основные выводы исследования:

1. Необходимость регулярного мониторинга температурно-влажностных параметров с получением данных в режиме реального времени, что обеспечивает оперативное выявление зон и периодов повышенного риска.
2. Разработка комплексных параметров сохранности, интегрирующих данные о температуре, влажности, тепловых и воздушных потоках, как основу для оценки и прогнозирования состояния объекта.
3. Определение целевых значений микроклиматических параметров, позволяющих минимизировать риск влагонакопления, кристаллизации солей и температурных деформаций материалов.
4. Внедрение локальных инженерных решений (регулируемая вентиляция, локальное осушение и подогрев воздуха) в наиболее уязвимых зонах без нарушения аутентичности архитектурного облика.
5. Организационные мероприятия по регулированию посещаемости, адаптированные к текущим внутренним и внешним климатическим условиям, для снижения антропогенной нагрузки на объект.

Полученные результаты демонстрируют, что эффективное сохранение неотапливаемых исторических сооружений требует сочетания архитектурных, климатических и материаловедческих методов, интегрированных в единую систему управления микроклиматом.

Практическая значимость работы заключается в разработке инженерных мер и алгоритмов адаптивного климат-контроля, которые минимизируют воздействие внешней среды на памятник. Предложенный подход может служить основой для создания универсальной методики сохранения объектов культурного наследия в условиях резко континентального климата.

Результаты исследования также могут быть использованы при формировании нормативной базы и методических рекомендаций в области микроклиматической безопасности памятников архитектуры [9; 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 131.13330.2012 Строительная климатология.
2. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата.
3. ASHRAE Handbook – HVAC Applications (2021).
4. Smith, J. Historic Preservation and Environmental Controls / J. Smith, L. Zhang // Building Conservation, 2020.
5. Умнякова, Н. П. Анализ температурных колебаний в купольных конструкциях / Н. П. Умнякова // Строительные материалы. – 2019. – № 8.
6. Чернышев, В. А. Архитектурные памятники Средней Азии: проблемы сохранности / В. А. Чернышев, Н. М. Алтынбеков // Наследие Востока, 2021.
7. Camuffo, D. Microclimate for Cultural Heritage / D. Camuffo. – Elsevier, 2019.
8. CEN/TR 17520:2020. Conservation of Cultural Heritage – Environmental Guidelines. European Committee for Standardization.
9. Bratasz, Ł. Allowable Microclimatic Variations in Museums and Archives / Ł. Bratasz // Studies in Conservation. – 2010.
- 10 Staniforth, S. Preventive Conservation: Reducing Risk to Heritage / S. Staniforth. – Routledge, 2013.