

УДК: 72.03

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_214

EDN: SPMYCE



## Проблема эрозии фасадов исторических зданий от воздействий косого дождя

А.М. Сулейманов<sup>1</sup>, А.Г. Хабибулина<sup>1</sup>, А.С. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за воздействия косого дождя. Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов под воздействием косых дождей. Задачами исследования являются обзор современных методов измерения влияния дождя с ветром на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка; анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов; предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за воздействия косого дождя.

*Результат.* На основе анализа современных исследований, предложены рекомендации по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за воздействий косого дождя. В Казанском государственном архитектурно-строительном университете создан испытательный комплекс «Герметичная камера» позволяющий, с учётом передового зарубежного опыта, проводить дальнейшие экспериментальные исследования по оценке влияния воздействий косого дождя на эрозию поверхности и снижения прочности строительных материалов.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитекторов и проектировщиков состоит в том, что использование методов оценки степени повреждения фасадов памятников архитектуры из-за воздействий косых дождей позволяют осуществлять мониторинг и выработать меры по защите объектов культурного наследия.

**Ключевые слова:** косой дождь, эрозия каменной кладки, защита фасадов памятников архитектуры.

**Для цитирования:** Сулейманов А.М., Хабибулина А.Г., Петров А.С. Проблема эрозии фасадов исторических зданий от воздействий косого дождя // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 214-224, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_214, EDN: SPMYCE

# The problem of erosion of facades of historic buildings from wind impact of rain

A.M. Suleymanov<sup>1</sup>, A.G. Khabibulina<sup>1</sup>, A.S. Petrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract. Problem statement.** The relevance of the study is due to the fact that surface erosion of building materials is a common phenomenon observed on the facades of historic buildings. Climatic changes may lead to an increase in the frequency and intensity of extreme precipitation events, which may increase erosion effects on building facades due to the impact of oblique rainfall. The aim of the study is to compare experimental methods for assessing the degree of surface erosion of historic building materials under the influence of oblique rainfall. The objectives of the study are to review modern methods of measuring the effect of rain with wind on surface erosion and strength reduction of bricks and limestone; to analyze the most known methods of assessing the degree of erosion of the surface of building materials; to propose recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the impact of oblique rain.

**Results.** Based on the analysis of modern research, recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the effects of oblique rain are proposed. Kazan State University of Architecture and Engineering has created a testing complex «Sealed chamber», which allows conducting further experimental research to assess the impact of oblique rain on surface erosion and strength reduction of building materials taking into account the advanced foreign experience.

**Conclusions.** The significance of the results obtained for architects and designers is that the use of the methods for assessing the degree of damage to the facades of architectural monuments due to the effects of oblique rainfall allow monitoring and developing measures to protect cultural heritage sites.

**Keywords:** wind-driven rain, erosion of masonry, protection of facades of monuments.

**For citation:** Suleymanov A.M., Khabibulina A.G., Petrov A.S. The problem of erosion of facades of historic buildings from wind impact of rain // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 214-224, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_214, EDN: SPMYCE

## 1. Введение

Эрозия исторических строительных материалов, вызванная ветром и дождем, является глобальной проблемой. Эрозия разрушает материалы, повреждает поверхности объектов культурного наследия (ОКН), повышает риск проникновения воды в пористые материалы [1-3]. Большое количество осадков, особенно в более теплом климате, увеличивает коррозию металлов и стекловидных материалов и отслаивание поверхности карбонатных камней, например известняка и мрамора [4]. Коррозия вызывает постепенное ухудшение свойств материалов под действием воды, обычно вместе с отложением солей (обычно хлоридов), что более распространено в присутствии кислотных дождей, и более высоких атмосферных концентраций углекислого газа (CO<sub>2</sub>) для карбонатных камней.

Кислотные дожди встречаются во многих странах мира, но наиболее подвержены им те регионы, где высокий уровень промышленного загрязнения воздуха. Среди таких стран можно назвать Соединенные Штаты и Канаду, Восточную Европу, включая Польшу, Германию, Чехию, Швецию, Норвегию и Финляндию, а также Китай и Индию. Кислотные дожди причиняют серьезный ущерб окружающей среде и культурному наследию этих стран. Для фасадов зданий в странах, где ожидается увеличение количества осадков (например, в северной Европе), существует риск того, что это вызовет еще большую коррозию каменных поверхностей зданий из портового известняка и низкопористых карбонатных пород, таких как мрамор и плотный известняк.

«Чистые» осадки имеют рН около 5,6 (слегка кислые из-за углекислого газа в атмосфере) и вызывают деградацию карбонатных камней – явление, известное как карстовый эффект. Поскольку атмосферная концентрация  $\text{CO}_2$  увеличивается из-за деятельности человека, ученые предсказывают увеличение регрессии карста карбонатных камней из-за дальнейшего окисления осадков. Коррозию каменных поверхностей исторических зданий часто связывают с загрязнением окружающего воздуха. Загрязнение воздуха включает диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) и оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), которые реагируют с водой и образуют серную и азотную кислоты. Их присутствие может еще больше снизить рН дождевой воды, вызывая кислотные осадки [5-7].

Изменения влажности влияют на рост микроорганизмов на каменных и деревянных материалах памятников архитектуры. Ряд исследований показывают, что увеличение относительной влажности в более теплом климате усугубляет биологическую деградацию ОКН. Длительные периоды влажности вместе с повышением температуры создают условия, благоприятные для увеличения биологической активности, способствующих разрушению деревянных исторических зданий из-за накопления и разложения биомассы грибами, водорослями, плесенью и лишайниками, а также насекомыми. Исследователи определяют температуру, влажность воздуха и содержание влаги в древесине в качестве трех основных переменных, ведущих к биологическому износу из-за грибов, плесени и насекомых, при этом на содержание влаги в древесине влияют увеличение количества осадков, ветро-дождевая нагрузка и наводнения [8-10].

Когда стены намокают под осадками или из-за подсоса влаги из грунта, вода проникает в поры кирпича и раствора. Растворимые соли могут растворяться и рекристаллизоваться при изменении температуры и влажности, создавая циклы кристаллизации соли. Соли будут выходить из пор на поверхность стены и образовывать белый или цветной налет – высолы. Некоторые соли могут изменять свою структуру во время цикла гидратации и дегидратации, например, сульфат натрия (тенардит) и декагидрат сульфата натрия (мирабилит). Фаза мирабилита может оказывать очень высокое кристаллизационное давление на поры в камне, такие повторяющиеся циклы могут вызвать стресс и, в конечном итоге, разрушение. Колебания осадков и температуры при наличии растворимых солей в каменных материалах приведут к увеличению числа циклов кристаллизации солей и, следовательно, к большему ущербу ОКН. Содержание солей в строительном материале или конструкции также может увеличиваться за счет увеличения количества осадков, что приводит к насыщению почв в сочетании с капиллярным действием. Даже небольшие колебания относительной влажности могут оказать существенное влияние на количество циклов кристаллизации вредных солей. Когда относительная влажность падает ниже точки растворения некоторых растворимых солей, они переходят из раствора в кристаллическую фазу. Механизм повреждения заключается в том, что при кристаллизации солей изменение объема оказывает механическое воздействие на исторические строительные материалы (например, субфлуоресценция) [11, 12].

Эрозия поверхности является обычным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. В последнее время исследования изменения климата и его возможного влияния на увеличение количества экстремальных осадков возродили научный интерес к определению риска ускоренных эрозионных эффектов. В зарубежных исследованиях воздействие косого дождя (ВКД или WDR – Wind-driven rain), рассматривается как один из важных факторов при проектировании прочных и устойчивых к изменению климата зданий. Согласно классификации ГОСТ Р 53613-2009, косой дождь является сочетанием дождя и ветра. Негативные последствия проникновения влаги, вызванные ВКД, включают деградацию материала поверхности, повреждение от мороза, выцветание от солей, структурное растрескивание, внутренние повреждения и т.д. Нагрузки из-за ВКД на фасады зданий пропорциональны осадкам и представляют собой основной источник влаги и эрозионное физическое воздействие на фасады зданий. Исходя из этого, исследование методов оценки, которые количественно определяют серьезность эрозии, является важным шагом для разработки рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов ОКН [13, 14].

На сегодняшний день для измерения и моделирования ВКД на фасады зданий исследователями предлагаются следующие методы: экспериментальные, полуэмпирические и численные с помощью вычислительной гидродинамики (ВГД или CFD – Computational Fluid Dynamics) [15, 16]. Основное преимущество экспериментальных методов в том, что они позволяют проводить исследования влияния ВКД на объект в реальных условиях (что повышает достоверность результатов) и проверять полуэмпирические и численные методы [17, 18]. Авторами в рамках данной работы, на основе анализа исследований последних лет, рассматриваются наиболее известные и общепризнанные за рубежом экспериментальные методы оценки ВКД на поверхности фасадов ОКН.

Актуальность исследования обусловлена тем, что эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах памятников архитектуры. Деструктивное воздействие внешней среды приводит к ухудшению внешнего вида, снижению прочности и долговечности материалов, а также к повышению риска развития плесени и повышения влажности внутри помещений. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за ВКД.

Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.

Задачами исследования являются:

- обзор современных методов измерения влияния ВКД на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка;
- анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД;
- предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.

## 2. Материалы и методы

На основе анализа исследований последних лет, можно выделить следующие наиболее известные и признанные экспериментальные методы оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов из-за ВКД:

1. Натурное измерение ВКД в определенных местах на фасаде здания позволяющее оценить воздействие ВКД на поверхность и риски эрозии. Для этого используются специальное оборудование для сбора метеорологических данных, датчики и коллекторы дождя [18]. На следующем этапе, для проверки данных полевых измерений и прогнозирования ВКД предлагается использование численного моделирования с помощью программного комплекса ВГД [19].

2. Использование в лабораторных условиях системы имитирующей ВКД для образцов строительных материалов на испытательном стенде, позволяющее проводить контролируемые эксперименты с разными типами покрытий фасадов. Для имитации ВКД применяются специальные насосы и форсунки. Фиксации данных производится с помощью высокоскоростной камеры, цифрового и компьютерного оборудования. После испытания образцы диагностируются на степень деградации поверхностной структуры и определяется остаточная прочность материалов [20].

На основании результатов, полученных с применением натуральных измерений ВКД можно сделать следующие выводы [18]:

- неравномерность эрозии, степень загрязнения поверхности фасадов здания связана с неоднородностью распределения, направлений ВКД из-за объёмно-планировочных особенностей строения;
- влияние ВКД зависит от локальных полей потока воздуха, связанных с геометрией здания, окружающей топографией и близости других препятствий;
- наибольшее количество дождя попадает на стену, обращенную против ветра, увеличивается с высотой здания и больше на угловых секциях, чем центральных;
- интенсивность ВКД, может быть лучшим индикатором эрозии поверхности здания, чем объем выпавших осадков.

В рамках исследования, дополнительно было проведено численное моделирование влияния ВКД с использованием ВГД, включающее следующие вычисления: расчет поля воздушного потока вокруг здания, определение траекторий капель дождя и оценку общего ВКД на основе метеорологических данных [19]. Данные численного моделирования согласуются с результатами полевых испытаний.

Измерения ВКД на различные материалы каменной кладки в лабораторных условиях демонстрируют следующее [20]:

- степень воздействия капель воды определенного диаметра, скорости и угла удара. Это помогает понять тенденцию высвобождения энергии капель воды на поверхности материалов;

- количество воды, удерживаемое поверхностью образца после удара капли. Во время дождя не все капли прилипают к поверхности и представляют собой источник влаги для стены. Часть капель после удара о поверхность отскакивают или разбрызгиваются;

- увеличение размера капли воды приводит к большему разбрызгиванию и стеканию после удара о поверхность;

- влияние шероховатости поверхности материала на поглощение влаги при ударе капель дождя. Чем шероховатее поверхность, тем больше происходит разбрызгивание капель;

- максимальный выброс кинетической энергии, инициирующий потенциальное истощение поверхности материала, происходит при угле воздействия капли 90° (перпендикулярно стене);

- интенсивность эрозии поверхности и снижения прочности материала в зависимости от параметров дождя и свойств материалов.

### 3. Результаты и обсуждение

Мониторинг метеорологических данных является важным инструментом для оценки ВКД на фасад здания, имеющего историческую ценность. Данный мониторинг позволяет определить частоту, интенсивность и продолжительность ВКД для данной местности. Это может помочь инженерам, архитекторам и реставраторам спрогнозировать возможные негативные ситуации и определить требуемые первоочередные меры защиты для сохранения ОКН от ВКД (рис. 1).

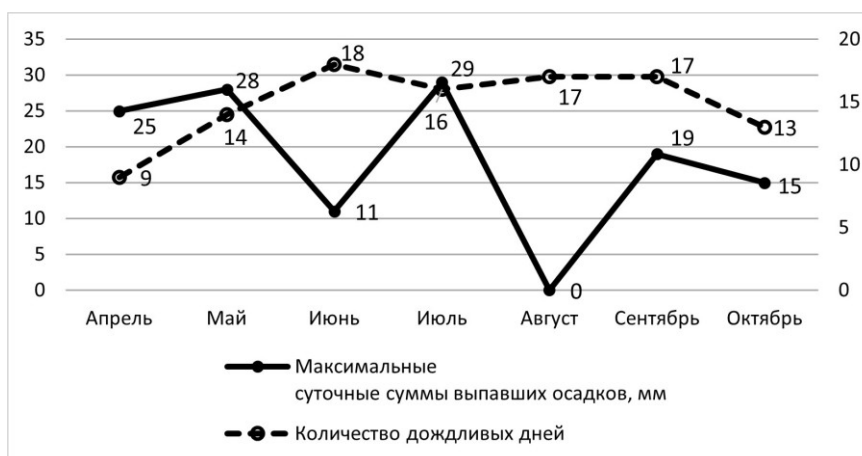


Рис. 1 – Метеорологических данные для оценки ВКД на здание – г. Казань, Россия (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Meteorological data for the assessment of WDR on the building – Kazan, Russia (Illustration by the authors)

На рисунке 1 представлены метеорологических данные для оценки ВКД на здание

на примере г. Казани<sup>1</sup>. Расположение метеорологической станции: широта – 55.73, долгота – 49.20, высота над уровнем моря – 119 м. Для оценки ВКД приняты данные периода с положительными средними месячными температурами (апрель-октябрь). На комбинированном графике представлены максимальные суточные суммы выпавших осадков (мм) и количество дождливых дней. Также при расчетах ВКД необходимо учитывать повторяемость и скорость ветра при различных его направлениях.

На линейчатой диаграмме отражены повторяемость (%) и скорость ветра (м/с, данные указаны в скобках) при различных направлениях ветра.

Регулярный мониторинг, обслуживание и реставрация являются неотъемлемым основанием для сохранения ОКН. Разработка мер по защите фасадов памятников историко-архитектурного наследия от ВКД – это сложный и многогранный процесс, который требует тщательных исследований и учета множества факторов:

- историческое значение памятника и его уникальность, так как некоторые методы консервации могут негативно влиять на оригинальность и аутентичность ОКН;
- климатические условия региона, интенсивность атмосферных воздействий;
- конструктивные особенности объекта, которые могут повлиять на выбор технических решений при реставрации;
- тип исторических строительных материалов, от которых зависит уровень сопротивления атмосферным воздействиям, долговечность и определение подходов к консервации;
- степень повреждения объекта – например для фасадов с небольшими повреждениями достаточно применять методы профилактики и регулярного ухода, в то время как при серьезных дефектах может потребоваться капитальный ремонт;
- финансовые затраты – технически сложные методы консервации могут быть слишком дорогостоящими.

Авторами предлагаются следующие основные способы по защите фасадов зданий ОКН от ВКД.

В последние десятилетия интерес к разработке защитных покрытий для ОКН значительно возрос. В основном это вызвано повышением требований к сохранению ОКН, что, соответственно, определило разработку новых защитных продуктов, с использованием научно-технических достижений. В настоящее время, результаты исследований в области защитных покрытий для фасадов памятников архитектуры сделали большой шаг вперед – от акриловых смол, использовавшихся в конце прошлого века, до применения биоматериалов и наночастиц [21].

Защитные покрытия для фасадов ОКН должны соответствовать следующим основным критериям:

- эффективно предохранять от воздействия окружающей среды;
- быть совместимыми с аутентичным материалом;
- сохранять первоначальный внешний вид, цвет, прочность и долговечность исторического материала; минимизировать риск повреждения и коррозии;
- предоставлять возможность легкой очистки и ухода за поверхностью здания;
- исключать токсичность состава; обладать длительным сроком службы.

На сегодняшний день можно выделить следующие инновационные защитные покрытия для фасадов зданий от деструктивных воздействий окружающей среды [22]:

- гибридные органо-неорганические золь-гели, обладающие прозрачностью, водоотталкивающими свойствами, оптимальной степенью эластичности и стабильностью при тестах на износ и коррозию;
- силиконовые соединения, демонстрирующие хорошие антикоррозийные свойства;
- биопленки и биополимеры, применяемые для защиты строительных материалов от загрязнений, которые при необходимости легко удаляются;
- наночастицы используемые для улучшения защитных свойств покрытий.

Перспективным направлением является применение защитных покрытий фасадов от ВКД, созданных с использованием нанотехнологий. Преимущество нанопокровов, в

<sup>1</sup> Научно-прикладной справочник «Климат России». ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn> (дата обращения: 01.01.2023).

том, что их применение содействует приобретению строительным материалам ряда важных свойств: устойчивости к атмосферным воздействиям, ультрафиолетовому излучению, механическим повреждениям; воздействию экстремальных температур; водо- и грязеотталкиванию; воздухопроницаемости и экологичности; препятствию распространения плесени, грибка, микроорганизмов. Например, исследования подтверждают эффективность использования гидрофобных покрытий на основе полимеров и наночастиц оксидов  $TiO_2$  (диоксид титана) или  $SiO_2$  (диоксид кремния) для защиты фасадов памятников архитектуры из камня от воздействия негативных факторов внешней среды [23]. Применение нанопокровов, на сегодняшний день, ограничено их высокой стоимостью, сложностью производства и требованиями дополнительной экспертной оценки.

При принятии решения о том, какое защитное покрытие для защиты фасада исторического здания от ВКД использовать, реставратору необходимо учитывать следующие основные факторы: климатические условия региона; возраст, состояние, строительный материал, характерные особенности фасада, декоративных деталей; ожидаемый срок службы покрытия и др. Сравнительный анализ различных покрытий может помочь выбрать оптимальный вариант исходя из конкретных требований проекта реставрации.

ВКД как значительный источник влаги способствует эрозии растворных швов и приводит к увеличению влагопереноса в толщу каменной кладки. Соответственно, в качестве меры по уменьшению проникновения влаги/воды, связанного с ВКД, эффективен способ, заключающийся в реставрации швов эродированного раствора [24]. При этом важно учитывать состав и историческую технологию изготовления заменяемых материалов. Включение в конструкцию новых составов, принципиально различающихся по физико-механическим и химическим свойствам, может привести к деструкции исторического строительного материала. При анализе состава оригинального раствора необходимо использовать химические или петрографические методы. Некоторые исторические растворы, особенно, в зданиях, построенных в 19 веке, были окрашены, чтобы соответствовать цвету кирпича, камня или контрастировать с ними. Наиболее используемые в прошлом пигменты молотый кирпич и уголь. При реставрации в составе пигментов, чтобы предотвратить выцветание и блеклость, возможно использовать синтетические минеральные оксиды, которые устойчивы к щелочам и солнечному свету. Реставрация швов кладки, является трудоемкой и дорогостоящей мерой, но оправданной для ОКН [25].

Одним из способов эффективной защиты фасадов исторических памятников от ВКД является поддержание в надлежащем состоянии карнизных свесов кровли здания. При этом необходимо учитывать климатические условия района строительства, такие как интенсивность осадков, преобладающая скорость, направление и угол воздействия ветра. Свес особенно эффективен и значительно снижает воздействие ВКД на верхнюю часть фасада строения. Большой свес обеспечивает лучшую защиту. Защитная зона может распространяться до 25 % высоты здания от линии крыши при вылете 0,6-1,2 м. Учитывая, что более 50 % общего количества осадков, падающих на фасад, приходится на верхние 15 % поверхности стены, свесы, которые могут укрыть до 30 % строения, являются лучшей защитой от ВКД. Эффективность возрастает при косых ветрах, но снижается с увеличением скорости ветра [26].

Деревья, как естественные барьеры, причем не затрагивающие аутентичность ОКН, могут иметь важное значение при защите фасадов зданий от ВКД. Однако, для эффективного использования деревьев в качестве барьера от ВКД необходимо учитывать следующие факторы:

- климатические условия региона – метеорологические данные и особенности местности. Например, если местность характеризуется частыми дождями или сильными ветрами, то необходимо подобрать наиболее подходящие деревья, которые могут выдерживать такие условия;

- скорость и направление ветра – растения, размещенные вблизи зданий, могут оказывать влияние на скорость и направление ветра вокруг зданий. Деревья должны быть размещены таким образом, чтобы создавать наиболее эффективный барьер от ВКД.

Также, необходимо учитывать характеристики конкретных видов растений, такие как высота, ширина кроны, густота листвы и т.д.;

- интенсивность дождя – определенные виды растений могут лучше защищать здание от сильных ливней. Например, деревья с плотной листвой и кроной могут обеспечить более эффективную защиту, чем деревья с разреженной листвой;

- ориентация и геометрия здания – при посадке деревьев необходимо учитывать конфигурацию здания, ориентацию фасадов по сторонам света и повторяемость различных направлений ветра для данной местности.

В Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ), на базе научно-исследовательской лаборатории «Архитектурной физики», в соответствии с ГОСТ 26602.2-99, спроектирован и смонтирован стационарный испытательный комплекс «Герметичная камера». Комплекс предназначен для создания, поддержания и изменения давления воздуха до 700 Па во временном интервале от 1 с до 10 мин., а также создания процесса дождевания и обеспечивает абсолютную герметичность. Комплекс состоит из следующего технического оборудования: компрессоров, воздушных насосов, регуляторов давления, перепадов давления, расхода воздуха, запорной арматуры. Испытательный комплекс оснащен единым пультом управления с системой компьютерной обработки данных, позволяющим обеспечить автоматическое управление процессом испытания и предоставления результатов в виде протокола (рис. 2). Оснащение испытательного комплекса «Герметичная камера» позволяет, с учётом передового зарубежного опыта, проводить дальнейшие экспериментальные исследования по оценке влияния ВКД на эрозию поверхности и снижения прочности строительных материалов.



Рис. 2. Испытательный комплекс «Герметичная камера» – КГАСУ, г. Казань, Россия  
(иллюстрация авторов)

Fig. 2. «Hermetic chamber» test facility – KSUAE, Kazan, Russia (Illustration by the authors)

#### 4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе анализа современных исследований, были выделены наиболее известные методы оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.
2. Проведён критический анализ рассмотренных методов с учётом репрезентативности получаемых результатов.
3. Предложены рекомендации по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.
4. Данная работа может послужить основой для дальнейшей апробации методов учета ВКД при реконструкции и реставрации ОКН.



**Список литературы/ References**

1. Xavier R., Chiara B. Risk protection for cultural heritage and historic centres: Current knowledge and further research needs // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 67. 102652. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102652.
2. Bonazza A., Sardella A., Kaiser A., Cacciotti R., De Nuntiis P., Hanus C., Maxwell I., Drdácý T., Drdácý M. Safeguarding cultural heritage from climate change related hydrometeorological hazards in Central Europe // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 63. 102455. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102455.
3. Sesana E., Gagnon A., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review // *WIREs Climate Change*. 2021. No 12 (1). 29 p. DOI: 10.1002/wcc.710.
4. Camuffo D. Climate change, human factor, and risk assessment // *Microclimate for cultural heritage*. 2019. P. 303–340. Elsevier.
5. Spezzano P. Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 754. 142345. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142345.
6. Berdnikov V., Stroganov V., Vdovin E., Stroganov I., Gasilov V. Corrosion Processes in Building Materials, Products and Structures // *Proceedings of STCCE 2022. STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 291. Springer, Cham. P. 465–481. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7\_40.
7. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drventić I., Grgić I., Kroflič A. Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: a critical review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 46405–46437. DOI: 10.1007/s11356-022-20309-8.
8. Sterflinger K., Little B., Pinar G., Pinzari F., de los Rios A., Gu J.-D. Future directions and challenges in biodeterioration research on historic materials and cultural properties // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018. Vol. 129. P. 10–12. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.12.007.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Савичева К.В., Шаехов Р.А., Бикмухаметова А.Р., Хайрутдинова Д.Р., Нигматзянова Р.Р., Нигматуллина Г.Р. Использование модельных сред для оценки процессов биоповреждения строительных материалов // *Химия и инженерная экология : XVII Международная научная конференция*. 2017. Казань: Изд-во «Бриг». С. 168-171 [Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Savicheva K.V., Shayekhov R.A., Bikmukhametova A.R., Khairutdinova D.R., Nigmatzyanova R.R., Nigmatullina G.R. Use of model environments to assess the processes of biodegradation of construction materials // *Chemistry and Engineering Ecology: XVII International Scientific Conference*. 2017. Kazan: Brig Publishing House. P. 168-171].
10. Prieto B., Vázquez-Nion D., Fuentes E., Durán-Román A.G. Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO2 conditions // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. Vol. 148. 104882. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.104882.
11. Stryzewska T., Kańka S. The Effects of Salt Crystallization in Ceramic Bricks in Terms of Line Deformations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. P. 120–127. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.194.
12. Menéndez B. Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage // *Geosciences*. 2018. No 8 (11). 401. DOI: 10.3390/geosciences8110401.
13. Никитин В.И., Кофанов В.А. Об учете косо́го дождя и капиллярных свойств материалов при оценке влагосодержания ограждающих конструкций // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2013. № 1 (79). С. 91–95 [Nikitin V.I., Kofanov V.A. Consideration of driving rain and capillary properties of materials when assessing moisture enclosing structures // *Vestnik of BrSTU. Construction and architecture*. 2013. No 1 (79). P. 91–95].
14. Куприянов В.Н., Петров А.С., Чебышева Д.Г. Влияние дождей на процесс старения и разрушения материалов наружных стен. расчет количества дождей // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 1 (4). С. 28–32 [Kupriyanov V.N., Petrov A.S., Chebysheva D.G.

- Rain impact on aging and destruction of external walls materials. the amount of rain calculation // *Expert: theory and practice*. 2020. No 1 (4). P. 28–32].
15. Lu B., Fang J., Li Y., Zhang H., Gao Y., Feng C. Accuracy of semi-empirical models for wind-driven rain using different data processing methods for wind velocity and direction // *Building and Environment*. 2023. Vol. 237. 110300. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110300.
  16. Gholamalipour P., Ge H., Stathopoulos T. Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review // *Building and Environment*. 2022. Vol. 221. 109314. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109314.
  17. Van Linden S., Van Den Bossche N. Review of rainwater infiltration rates in wall assemblies // *Building and Environment*. 2022. Vol. 219. 109213. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109213.
  18. Tang W., Davidson C.I., Finger S., Vance K. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 1. Field measurements // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5589–5599. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.030.
  19. Tang W., Davidson C.I. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 2. Numerical modeling // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38, Issue 33. P. 5601–5609. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.014.
  20. Erkal A., D'Ayala D., Sequeira L. Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials // *Building and Environment*. 2012. Vol. 57. Pp. 336–348. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.05.004.
  21. Stroganov V.F., Amel'chenko M.O., Mukhametrakhimov R.K., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increasing the Adhesion of Styrene-Acrylic Coatings Modified by Schungite Filler in Protection of Building Materials // *Polymer Science, Series D*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 162–165. DOI: 10.1134/S1995421222020277.
  22. Artesani A., Di Turo F., Zucchelli M., Traviglia A. Recent Advances in Protective Coatings for Cultural Heritage – An Overview // *Coatings*. 2020; No 10 (3). 217. DOI: 10.3390/coatings10030217.
  23. Pino F., Fermo P., Russa M.L., Ruffolo S., Comite V., Baghdachi J., Pecchioni E., Fratini F., Cappelletti G. Advanced mortar coatings for cultural heritage protection. Durability towards prolonged UV and outdoor exposure // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No 24 (14). Pp. 12608–12617. DOI: 10.1007/S11356-016-7611-3.
  24. Kahangi Shahreza S., Niklewski J., Molnár M. Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102583.
  25. Apostolopoulou M., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. Compatible mortars for the sustainable conservation of stone in masonries // *Advanced Materials for the Conservation of Stone*. 2018. Pp. 97–123. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-72260-3\_5.
  26. Ge H., Chiu V., Stathopoulos T. Effect of overhang on wind-driven rain wetting of facades on a mid-rise building: Field measurements // *Building and Environment*. 2017. Vol. 118. Pp. 234–250. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.034.

### Информация об авторах

**Сулейманов Альфред Мидхатович**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [sulejmanov@kgasu.ru](mailto:sulejmanov@kgasu.ru)

**Хабибулина Альбина Гомеровна**, кандидат экономических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Петров Артем Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [ruarty@mail.ru](mailto:ruarty@mail.ru)

### **Information about the authors**

**Alfred M. Suleymanov**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: [sulejmanov@kgasu.ru](mailto:sulejmanov@kgasu.ru)

**Albina G. Khabibulina**, candidate of economical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Artem S. Petrov**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: [ruarty@mail.ru](mailto:ruarty@mail.ru)