

В.Н. КУПРИЯНОВ¹, А.Г. ХАБИБУЛИНА¹, А.М. СУЛЕЙМАНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия

ЗАЩИТА ФАСАДОВ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСОГО ДОЖДЯ: ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что 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; критический 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.

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

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

V.N. KUPRIYANOV¹, A.G. KHABIBULINA¹, A.M. SULEYMANOV¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

PROTECTING FACADES OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS FROM THE WIND-DRIVEN RAIN: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that erosion of the surface of building materials is a common phenomenon observed on the facades of historic buildings. Climatic changes can lead to an increase in the frequency and intensity of extreme precipitation, which can increase the erosion effects on the facades of buildings due to the wind-driven rain. The purpose of the study is to compare experimental methods for assessing the degree of surface erosion of historic building materials under the influence of wind-driven rainfall. The objectives of the study are to review modern methods for measuring the effect of rain with wind on the surface erosion and reduction of the strength of brick and limestone; to critically analyze the best-known methods for assessing the degree of erosion of the surface of building materials; to offer recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the wind-driven rain.

The significance of the obtained results for architects and designers is that the use of methods to assess the degree of damage to the facades of architectural monuments due to wind-driven rainfall makes it possible to monitor and develop measures to protect objects of cultural heritage.

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

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_2) 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 портландского известняка и низкопористых карбонатных пород, таких как мрамор и плотный известняк. «Чистые» осадки имеют pH около 5,6 (слегка кислые из-за углекислого газа в атмосфере) и вызывают деградацию карбонатных камней – явление, известное как карстовый эффект. Поскольку атмосферная концентрация 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 (SO_2) и оксиды азота (NO_x), которые реагируют с водой и образуют серную и азотную кислоты. Их присутствие может еще больше снизить pH дождевой воды, вызывая кислотные осадки [5, 6].

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 [7-10].

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, субфлоресценция) [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 [13-17].

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) [18, 19]. 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 [13, 20]. 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;
- критический 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.

Модели 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 [13]. На следующем этапе, для проверки данных полевых измерений и прогнозирования ВКД предлагается использование численного моделирования с помощью программного комплекса ВГД [14].

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 [15].

Метод натурных измерений ВКД

Замеры ВКД производились на высотном здании, построенном в 1930-х годах облицованном натуральным камнем из известняка [13]. Целью данной работы являлось исследование влияния ВКД на образование эрозии на поверхности фасадов зданий и разработки эффективных методов защиты. Работа проводилась в 42-этажном здании на территории кампуса Университета Питтсбурга (Пенсильвания, США). Наблюдались процессы осаждения загрязняющих веществ и смыва дождем на поверхности фасада объекта. В исследовании использовались метеорологические записи, данные о концентрации SO_2 (диоксид серы) в воздухе за несколько десятилетий. Также фиксировались текущие данные по сульфатам, элементарному углероду и числовой концентрации частиц. Замеры дождя на поверхности стен фасада производились в 16 местах в течении 21 месяца. За период измерения было зафиксировано 94 дождевых осадков. Каждая измерительная установка состояла из вертикального листа ПВХ размером 620x620 мм с квадратным желобом 40 мм. Дождевая вода, попадая на лист ПВХ, стекала в желоб и стекала в коллектор. Двенадцать коллекторов находились на 5-м этаже, а четыре дополнительных – на 16-м этаже (см. рисунок 1).

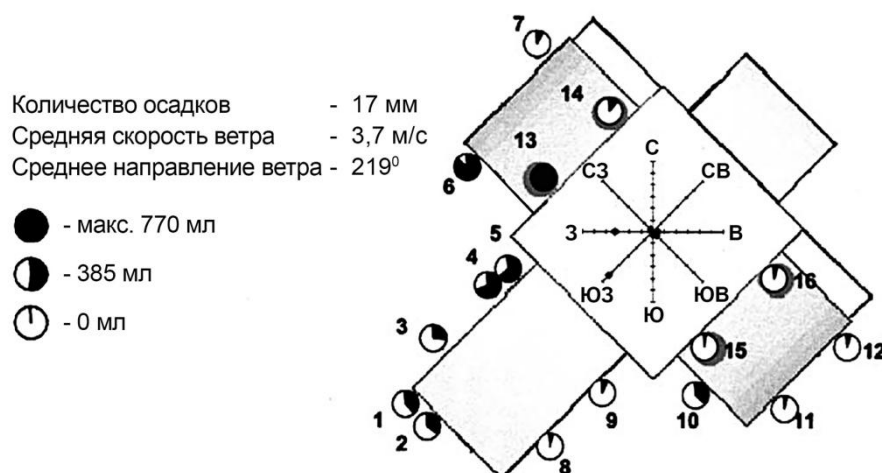


Рисунок 1 – План обследуемого здания. Пример сбора данных:
 1-16 – места установки коллекторов для сбора дождевой воды [13]

На рисунке 1 показан пример сбора данных, показывающий зависимость объема дождя (круговая диаграмма) от направления ветра и места измерения. Каждая пронумерованная круговая диаграмма показывает объем дождевой воды. Места были выбраны, чтобы определить количество падающих ветром дождевых стен, которые обращены в разные стороны на двух высотах. Некоторые коллекторы были расположены в загрязненных, черных местах на стенах фасада, а другие – в эродированных белых местах. Объем дождевой воды, собранной в каждом месте, измеряли вручную мерным цилиндром после каждого дождя. Эти измерения проводились в течение 24 часов после окончания дождя, чтобы свести к минимуму потери от испарения. Метеорологические данные собирались автоматической метеостанцией, состоящей из дождемера с опрокидывающимся ковшом, чашечного анемометра, флюгера и регистратора данных. Регистратор данных с интервалом в 15 минут фиксировал интенсивность осадков, среднюю скорость, частоту и направления ветра по восьми румбам.

Метод измерений ВКД на испытательном стенде

Для того, чтобы понять реакцию различных кладочных материалов на удары капель воды при ВКД, были выбраны исторические глиняные кирпичи ручной резки (19 век), обожженные глиняные кирпичи, необожженные глиняные кирпичи и известковый раствор [15]. Основная цель испытания заключалась в исследовании степени воздействия, под давлением направленного воздушного потока, капель воды определенного диаметра, скорости и угла удара на различные материалы каменной кладки. Диаметры капель 1,95 мм, 3,07 мм и 4,06 мм были сочтены подходящими и достаточно консервативными для испытаний, поскольку они в значительной степени способствовали эрозионной энергии и также использовались в других подобных исследованиях [21]. Капли различного диаметра выпускались через иглы для инъекций или бюретки на испытуемые образцы кладочных материалов с высоты 2,1 м, 3,2 м и 4,0 м. Для фиксации влияния угла удара капель, образцы кладки помещались на наклонные поверхности испытательного стенда 5° , 15° , 25° , 35° и 45° относительно вертикали. Углы регулировались цифровым угломером. Чтобы зафиксировать поведение и определить скорость удара капель использовалась высокоскоростная камера. Съемку производили с частотой 2000 кадров в секунду и разрешением 256-300 пикселей, что было достаточно для фиксации поведения падающих капель (см. рисунок 2).

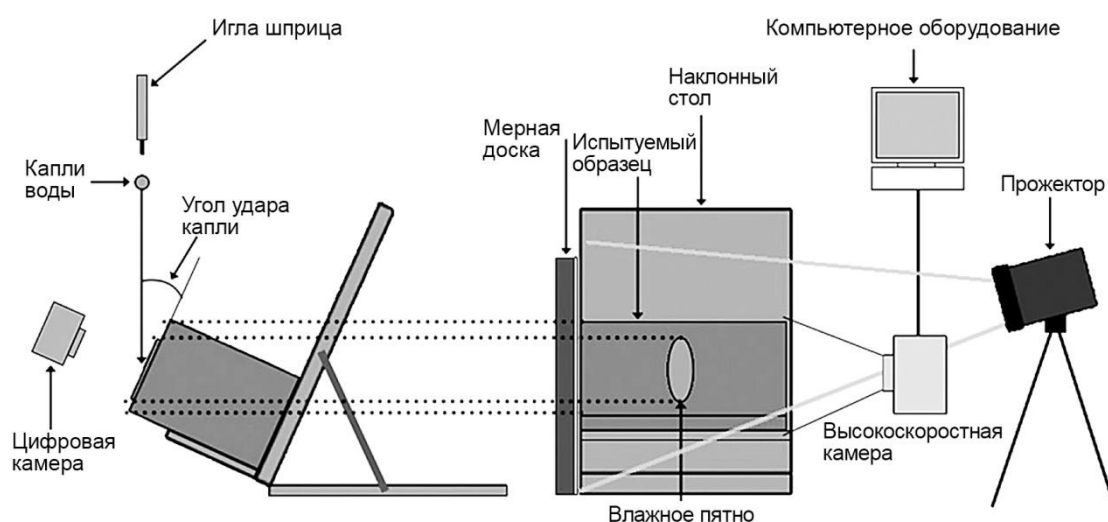


Рисунок 2 – Схема испытательной установки

Для уточнения результатов удара каждого размера капли, эксперимент проводился дважды на 2-х образцах одного и того же материала. Фиксировались доминирующие поведения капель при ударе, такие как прилипание, разбрызгивание, отскок или стекание, происходящие в течение нескольких миллисекунд. Данные показатели рассматривались как определяющие для получения результатов, позволяющие учитывать смачиваемость поверхности, шероховатость и пористость строительных материалов. На основе отпечатков от капель воды на испытанных образцах кладочных материалов после удара, рассчитывалось значение соотношения сторон пятна для каждой капли.

Результаты исследования и их анализ

На основании результатов, полученных с применением натуральных измерений ВКД можно сделать следующие выводы [13]:

- 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 [14]. Данные численного моделирования согласуются с результатами полевых испытаний.

Измерения ВКД на различные материалы каменной кладки в лабораторных условиях демонстрируют следующее [15]:

- 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.

Сравнительная характеристика методов оценки ВКД на фасад здания представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов оценки ВКД на фасад здания

Наименование показателя	Метод натурных измерений ВКД	Метод измерений ВКД на испытательном стенде
Вид испытаний	Натурные, эксплуатационные	Лабораторные, стендовые
Предмет исследования	Влияние ВКД на сохранность фасадов зданий из известняка [13].	Влияние ВКД на фасады исторических зданий, включая поверхностную эрозию и снижение прочности образцов строительных материалов – обожженного и необожженные глиняных кирпичей, известкового раствора [15].
Сущность метода	Измерение ВКД, исходя из геометрии здания, на разных уровнях с учётом направления. Сравнение объема дождевой воды со степенью эрозии стен фасада.	Использование имитатора ВКД для воспроизведения условий, позволяющих проводить контролируемые эксперименты с каплями воды разного размера с разной скоростью удара на ряд кладочных материалов с разной шероховатостью поверхности и характеристикой влагопоглощения при разных углах падения.
Входные параметры	- Метеорологические данные; - скорость и направление ветра; - интенсивность дождя; - геометрические параметры здания (конфигурация, высота, форма кровли). - расположение и ориентация поверхности, на которую падают осадки.	- Количество осадков; - размер капель, скорость, сила и угол удара; - ориентация образца относительно направления воздушного потока.
Выходные параметры	- Количество дождевых осадков, попадающих на фасад здания и их распределение; - параметры, влияющие на обесцвечивание и эрозию материалов; - деструктивное влияние ВКД на фасад здания исходя из геометрии объекта и сторон света.	- Количественная оценка риска эрозии и снижения прочности каменных материалов фасадов исторических зданий от ВКД; - изменение влагопоглощения, поверхностной шероховатости, механических свойств материалов.
Достоверность результатов	Результаты исследования ограничены точностью и недостаточным учетом многих факторов, и требуют дополнительных исследований для подтверждения.	На достоверность результатов влияет ряд субъективных факторов: квалификация оператора, его техническая и практическая подготовка, точность средств измерений, а также выбранная методика проведения экспериментов.
Преимущество метода	- Возможность получения данных о ВКД на здание в реальных условиях; - наглядная оценка влияния ВКД на поверхность фасада здания.	Возможность экспериментировать с различными условиями ВКД и строительными материалами исходя из технических возможностей лаборатории.
Ограничения и недостатки метода	- Ограниченный объем собранных данных; - сложность определения влияния отдельных параметров; - проблема выбора оптимальной продолжительности временного интервала исследования; - отсутствие учета влияния других факторов (загрязнение воздуха и воздействие ультрафиолетового излучения и т.д.); - требует больших затрат времени и ресурсов.	- Ограниченные возможности для имитации ВКД; - имитационное ВКД, созданное в лабораторных условиях, может отличаться от фактического; - определенный набор тестов на изменение физико-технические свойств строительных материалов от ВКД; - индикатор соотношения сторон пятен падающих капель на образец не даёт информации о количестве налипшей, проникающей или стекающей воды. - периодическая проверка средств измерений.

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 (см. рисунок 3).

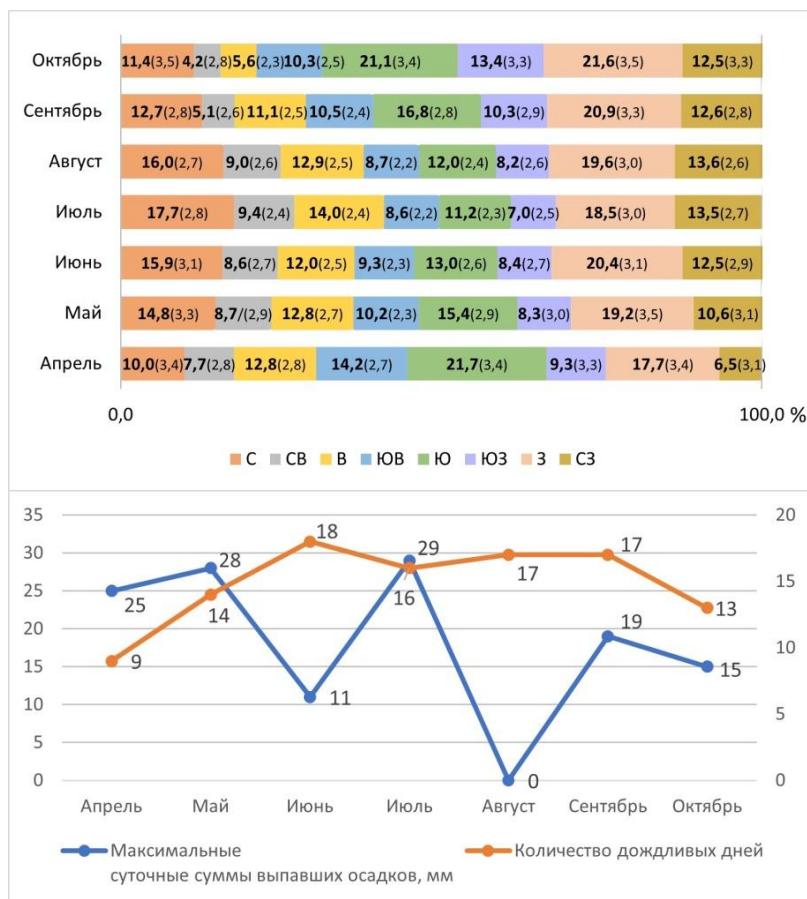


Рисунок 3 – Метеорологические данные для оценки ВКД на здание (г. Казань, Россия)¹

На рисунке 3 представлены метеорологические данные для оценки ВКД на здание на примере г. Казани. 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 линейчатой диаграмме отражены повторяемость (%) и скорость ветра (м/с, данные указаны в скобках) при различных направлениях ветра. Цветом наглядно обозначены преобладающие ветра в указанный период для данной местности. На комбинированном графике представлены максимальные суточные суммы выпавших осадков (мм) и количество дождливых дней.

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;

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

- 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.

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 антикоррозионные 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 нанопокрывтий, в 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 нанопокрывтий, 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.

Выводы

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

1. Haugen A., Mattsson J. Preparations for climate change's influences on cultural heritage // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2011. Vol. 3. No. 4. Pp. 386–401. doi:10.1108/17568691111175678
2. Brimblecombe P., Grossi C. M., Harris I. Climate change critical to cultural heritage // *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*. 2011. Pp. 195–205. Springer.
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. Pp. 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. 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. Pp. 46405–46437. doi:10.1007/s11356-022-20309-8
7. Cutler N.A., Viles H.A., Ahmad S., McCabe S., Smith B. J. Algal «greening» and the conservation of stone heritage structures // *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 442. Pp. 152–164. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.050
8. Строганов В.Ф., Бойчук В.А., Сагадеев Е.В. Биоповреждение древесных материалов и конструкций // *Известия КГАСУ*. 2014. № 2 (28). С. 185–193.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Вахитов Б.Р. Применение модельных сред для оценки биостойкости минеральных строительных материалов // *Известия КГАСУ*. 2017. № 3 (41). С. 196–202.
10. Prieto B., Vázquez-Niño 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. Бессонов И.В., Баранов В.С., Баранов В.В., Князева В.П., Ельчищева Т.Ф. Причины появления и способы устранения высолов на кирпичных стенах зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 7. С. 39–43.
12. Menéndez B. Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage // *Geosciences*. 2018. No. 8 (11). Pp. 401. doi:10.3390/geosciences8110401
13. 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
14. 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. Pp. 5601–5609. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.014
15. 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
16. Никитин В.И., Кофанов В.А. Об учете косого дождя и капиллярных свойств материалов при оценке влагосодержания ограждающих конструкций // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2013. № 1 (79). С. 91–95.
17. 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.
18. Blocken B., Dezsö G., Beeck J. van, Carmeliet J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades // *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. Issue 14. Pp. 1714–1725. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.011
19. 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

20. Baheru T., Chowdhury A.G., Pinelli J.-P., Bitsuamlak G. Distribution of wind-driven rain deposition on low-rise buildings: Direct impinging raindrops versus surface runoff // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. Vol. 133. Pp. 27–38. doi:10.1016/j.jweia.2014.06.023
21. Abuku M., Janssen H., Poesen J., Roels S. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 113–124. doi:10.1016/j.buildenv.2008.02.001
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 masonry // *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

REFERENCES

1. Haugen A., Mattsson J. Preparations for climate change's influences on cultural heritage. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2011. Vol. 3. No. 4. Pp. 386–401. doi:10.1108/17568691111175678.
2. Brimblecombe P., Grossi C. M., Harris I. Climate change critical to cultural heritage. *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*. 2011. Pp. 195–205. Springer.
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. Pp. 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. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drvenčić 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. Pp. 46405–46437. doi:10.1007/s11356-022-20309-8
7. Cutler N.A., Viles H.A., Ahmad S., McCabe S., Smith B. J. Algal «greening» and the conservation of stone heritage structures. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 442. Pp. 152–164. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.050
8. Stroganov V.F., Boichuk V.A., Sagadeev E.V. Biodeterioration of wooden materials and structures. *Izvestiya KGASU*. 2014. No. 2 (28). Pp. 185–193.
9. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Vahitov B.R. Application of model mediums for the biostability assessment of mineral construction materials. *Izvestiya KGASU*. 2017. No. 3 (41). Pp. 196–202.
10. Prieto B., Vázquez-Niño 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. Bessonov I.V., Baranov V.S., Baranov V.V., Knyazeva V.P., Elchischeva T.F. Reasons and eliminate efflorescence on the brick walls of buildings. *Housing Construction*. 2014. No. 7. Pp. 39–43.
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. 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
14. 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. Pp. 5601–5609. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.014
15. 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
16. Nikitin V.I., Kofanov V.A. On consider of driving rain and capillary properties of materials when assessing moisture enclosing structures. *Vestnik BrSTU. Construction and Architecture*. 2013. No. 1 (79). Pp. 91–95.

17. 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). Pp. 28–32. doi:10.24411/2686-7818-2020-10004
18. Blocken B., Dezsö G., Beeck J. van, Carmeliet J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades. *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. Issue 14. Pp. 1714–1725. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.011
19. 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
20. Baheru T., Chowdhury A.G., Pinelli J.-P., Bitsuamlak G. Distribution of wind-driven rain deposition on low-rise buildings: Direct impinging raindrops versus surface runoff. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. Vol. 133. Pp. 27–38. doi:10.1016/j.jweia.2014.06.023
21. Abuku M., Janssen H., Poesen J., Roels S. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 113–124. doi:10.1016/j.buildenv.2008.02.001.
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.jobbe.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:

Куприянов Валерий Николаевич

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры архитектуры, член-корреспондент РААСН.
E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

Хабибулина Альбина Гомеровна

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, кандидат экономических наук, доцент кафедры архитектуры.
E-mail: albgomer@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов.
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

Information about authors:

Kupriyanov Valery N.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, doctor of technical sciences, professor of the department of architecture, corresponding member of the RAACS.
E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

Khabibulina Albina G.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, candidate of economical science, associated professor of the department of architecture.
E-mail: albgomer@mail.ru

Suleymanov Alfred M.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, doctor of technical sciences, professor, head of building materials department.
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru