

УДК 628.511:72

В. Ю. Черепанов, В. И. Чурикова, В. В. Лупиногин, Р. А. Лясин

Волгоградский государственный технический университет

**К ВОПРОСУ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ,
СОДЕРЖАЩИХ В СВОЕМ СОСТАВЕ ГИГРОСКОПИЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ,
НА ОБЪЕКТЫ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ**

Как правило, атмосферные аэрозоли являются органическими, т. е. содержат в своем составе углерод, а также неорганические соединения $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{NaCl})$ и неорганические группы $(\text{SO}_4^{2-}, \text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-)$. При сухом способе осаждения ввиду неправильной формы частиц происходит механический износ поверхности оседания. Коррозионные процессы материалов объектов культурного наследия при мокром способе оседания твердых частиц из атмосферного воздуха определяются их химическим составом и гигроскопичностью.

К л ю ч е в ы е с л о в а: PM10, PM2,5, объект культурного наследия, адгезия, атмосферный воздух, твердые частицы, осаждение, загрязнение зданий, гигроскопичность, соли, кислоты.

Введение

Атмосферный аэрозоль, образующийся при выбросе твердых частиц (ТЧ) в атмосферный воздух, в зависимости от граничного диаметра можно классифицировать по режимам распределения их по массе и количеству. В работах [1—3] выделяют следующие режимы распределения частиц в атмосферном воздухе: нуклеации, Эйткена, накопления, грубый.

Распределение аэрозольных частиц в атмосферном воздухе, как правило, неоднородно, оно определяется метеорологическими параметрами (скоростью ветра, его направлением, атмосферным давлением, влажностью, температурой), параметрами источников выбросов и рядом других факторов, способных влиять на процесс образования аэрозольных частиц и их состояние в атмосфере. При этом стоит учитывать, что ряд параметров взаимосвязаны между собой [4—6].

Из-за сложности механизмов распределения частиц в атмосферном воздухе по режимам, влияния множества факторов окружающей среды используют упрощенную схему [1—3]. Так на основании схемы, представленной в [1], можно определить, что значительная доля частиц по массе соответствует режимам накопления и грубому, в то время как максимальное количество частиц наблюдается в режимах Эйткена, нуклеации. Воздействие ТЧ на объекты культурного наследия (ОКН) главным образом определяется массой, а не количеством, поэтому в представленном исследовании рассмотрено воздействие только частиц в режимах накопления, грубом.

Целью данного исследования является определение основного гигроскопического соединения, преобладающего в атмосферном воздухе г. Волгограда на основании гигроскопического эффекта роста частиц (коэффициент k -Келлера), для определения его воздействия на ОКН (здания).

Предполагаемый алгоритм основан на идентификации гигроскопического соединения по фактору роста частиц, который определяется коэффициентом k -Келлера. В работе [7] предложены аналитические уравнения, описывающие фактор роста частиц для некоторых неорганических соединений:

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 , NaCl и коэффициенты k -Келлера для них: $k((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4) = 0,61$; $k(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 0,67$; $k(\text{NaCl}) = 1,28$.

Методы определения концентрации пыли

Методы измерения и приборы, используемые для определения характеристик частиц, в зависимости от условий, периодичности измерений, определяемого параметра могут значительно различаться. Рассматриваемые параметры (концентрация, размер частиц) имеют решающее значение для обеспечения соответствия значений выбросов стандартам качества воздуха [8]. В настоящее время для определения концентрации ТЧ $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} в атмосферном воздухе используют методы анализа, основанные на различных физических принципах. Стоит выделить следующие: гравиметрический, микровесовой, оптический [1, 8].

Гравиметрические методы

Определение концентрации ТЧ методом фильтрации осуществляется осаждением частиц на поверхности фильтрующего материала при прокачке определенного объема исследуемой среды (атмосферного воздуха). С помощью представленного метода можно определить общую концентрацию пылевых частиц, а при наличии специальных фильтров, установленных в инспекторе перед основным, можно определить также содержание $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} . Гравиметрический метод измерения концентрации ТЧ не позволяет охватить промежуток времени менее 15 мин, который необходим для осаждения первых частиц [8].

Ситовой анализ ТЧ атмосферного аэрозоля осуществляется путем просеивания полученного порошкового материала через колонну сит с уменьшающимся размером ячеек. Частицы, оставшиеся на поверхности сит, называются остатком, прошедшие через сито — проходом. Результаты измерения можно представить в виде дифференциального и кумулятивного распределения по размерам. Ситовой метод анализа не подходит для анализа частиц диаметром менее $\text{PM}_{2,5}$, рекомендуется его использование для крупных и однородных частиц [9].

Микровесовые методы

В [10] рассмотрено измерение размера и массовой концентрации ТЧ с помощью микровесового метода. В его основе лежит измерение изменения резонансной частоты при налипании частиц на поверхность осциллирующего элемента. В настоящее время производятся два измерительных прибора, использующие микровесовой метод для определения параметров частиц — конические микровесы (ТЕОМ) и кварцевые микровесы (QCM).

Конические весы ТЕОМ измеряют массовую концентрацию частиц путем пропускания исследуемого окружающего воздуха через фильтрующий материал с постоянной скоростью потока. Прибор постоянно взвешивает фильтры, определяя по резонансной частоте их массу, по которой можно рассчитать массовую концентрацию практически в реальном времени. Конические микровесы ТЕОМ используют технологию FDMS, которая учитывает содержание летучих и нелетучих соединений в ТЧ. В отличие от множества измерителей прибор можно использовать без подключения персонального компьютера, с возможностью последующей выгрузки полученных данных по сети [1].

В кварцевых микровесах QCM измерение массы ТЧ, осевших на поверхности кварцевого резонатора, осуществляется путем измерения резонансной частоты пьезоэлектрического элемента, состоящего из кристаллов кварца, и определения массы частиц по уравнению Сауэрбри.

Оптические методы

Оптические счетчики частиц используют принцип рассеяния света для определения характеристик ТЧ. В качестве источника света в оптических счетчиках используется лазерный диод, который фокусируется на фотодетекторе с помощью набора линз. В зависимости от рассеяния лазерного луча на поверхности ТЧ можно определить их количество и диаметр. Оптические датчики бывают цифровыми и аналоговыми. Если оптический датчик цифровой, то размер частиц определяется по промежуткам в микросекундах. В том случае, если датчик аналоговый, размер частиц определяется по высоте импульса с использованием калибровочной кривой [8, 10].

Анализ методом лазерной дифракции основывается на измерении рассеянного света от нескольких лазерных лучей, проецируемых через поток частиц. Лазерный луч проецируется через измерительную ячейку, по которой идет поток частиц, суспендированных в жидкости или воздухе. Встречая на своем пути частицы, лучи рассеиваются. Рассеиваемый под разными углами свет измеряется группой фотодетекторов. Фотодетекторы измеряют количество света (поток) под определенными углами. Электрические сигналы, пропорциональные измеренным значениям светового потока, обрабатываются компьютером, строится многоканальная гистограмма распределения частиц по размеру [8, 11, 12].

В спектрометрах аэрозолей исследуемый образец аэрозоля проходит через прибор, частицы, в зависимости от их диаметра, приобретают различное ускорение. По полученному значению ускорения определяется аэродинамический диаметр частиц. Ускорение частиц определяется с помощью двух лазерных лучей. В дальнейшем время полета частиц между двумя лазерами преобразуется в аэродинамический диаметр с помощью калибровочной кривой [8, 13].

Анализатор дифференциальной подвижности частиц использует связь между электрической подвижностью и размером однозарядных частиц. Аэрозоль поступает в ударный импактор, где за счет инерционного удара удаляются частицы с превышающим максимальный измеряемый диаметром.

Первоначально для обеспечения фиксированного процента заряженных частиц они подвергаются действию биполярного заряда путем столкновения с биполярными ионами, происходит «биполярная нейтрализация». Посредством «биполярной нейтрализации» возникает равновесное состояние, когда известно количество частиц без заряда, с положительным и отрицательным зарядами. В дальнейшем с помощью дифференциального анализатора учитывается распределение подвижности частиц и, следовательно, их распределение по размерам на основе проведенных измерений [8, 14].

Рассмотренные методы в зависимости от технической оснащенности способны давать как обобщенную, так и более углубленную информацию о размере и концентрации частиц (табл. 1). При этом очевидно, что наиболее полную информацию о характеристиках ТЧ могут предоставить только оптические методы.

Т а б л и ц а 1

Методы измерения концентрации твердых частиц

Метод измерения	Измеряемый параметр	Измерения в реальном времени	Информация о размере частиц
Гравиметрический метод: фильтрация; ситовой анализ	Массовая концентрация	Нет	Только для фракций
Микровесовой метод: осциллирующие микровесы (ТЕОМ); кварцевые микровесы (QCM)	Массовая концентрация	Возможно только после 1 ч измерений	Только для фракций
Оптический метод: счетчики частиц; лазерные дифракторы; спектрометры аэрозолей (анализатор аэродинамического диаметра); анализатор дифференциальной подвижности частиц	Числовая, массовая концентрация	Да	Да

В настоящее время наиболее распространенным способом контроля концентрации ТЧ в атмосферном воздухе становятся недорогие оптические датчики частиц [1, 15, 16]. В работе [1] проанализирована актуальность использования недорогих датчиков частиц на основании интерпретированных данных из работы [17] (рис. 1).

Параметр	Экологические исследования	Качество воздуха	Персональный контроль
Чувствительность к массе	L M H	L M H	L M H
Временное разрешение	L M H	L M H	L M H
Физический размер	L M H	L M H	L M H
Портативность	L M H	L M H	L M H
Срок службы	L M H	L M H	L M H
Стойкость	L M H	L M H	L M H
Энергопотребление	L M H	L M H	L M H

Рис. 1. Рейтинг актуальности использования недорогих датчиков частиц [1]; адаптировано по данным [17]

Рейтинг актуальности показывает высокое значение параметров использования недорогих датчиков частиц для индивидуального мониторинга, мониторинга качества атмосферного воздуха, исследовательских целей. Рейтинг актуальности использования недорогих датчиков частиц для исследовательских

целей характеризуется средневысоким показателем параметров, за исключением физического размера — низкий. Объясняется это тем, что большинство недорогих датчиков частиц измеряют не единичные частицы, а множество частиц, поэтому возможно их перекрытие, когда несколько частиц совпадают в фотодетекторе [18].

Источники выброса твердых частиц в атмосферный воздух

В зависимости от способа образования ТЧ можно подразделить на первичные и вторичные.

Первичные ТЧ образуются в результате механического воздействия с образованием взвесей. Вторичные частицы возникают путем конденсации с образованием ТЧ из газа. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха в городах, как правило, вносят вторичные источники ТЧ [19—21].

Стоит выделить следующие источники загрязнения атмосферного воздуха ТЧ по их происхождению:

- антропогенные — автомобильный транспорт, промышленные предприятия, сжигание биомассы, бытовая деятельность человека, строительные работы;
- естественные — пыльные бури, морские аэрозоли, взвеси и обломки почвы.

Частицы, образующиеся при движении автомобильного транспорта, можно классифицировать на выхлопные и невыхлопные. К выхлопным относятся ТЧ, образованные в результате сгорания топлива (бензин, дизель) и испарения смазочных материалов. Невыхлопные частицы, образуются при износе шин, дорожного полотна, разметки, тормозов [21—24].

Предприятия как легкой, так и тяжелой промышленности также являются источниками поступления ТЧ в атмосферный воздух. К предприятиям тяжелой промышленности относятся следующие объекты: химические, электротехнические, сталелитейные, цементные заводы и др. Предприятия легкой промышленности, как правило, сосредоточены на производстве товаров народного потребления: кожевенные, текстильные, полиграфические комбинаты и др. [25—27].

В работе [28] определены следующие источники образования ТЧ при сжигании биомассы: пожары, сжигание мусора, производство древесного угля. При сжигании биомассы отходов сахарного производства в основном образуются ТЧ PM_{2,5} [29].

В [30, 31] выделяются в качестве источников бытового загрязнения ТЧ индивидуальные печи и местные котельные. В зависимости от вида используемого топлива выброс ТЧ достаточно сильно варьируется. При использовании каменного угля, дров, топочного мазута годовой выброс ТЧ в разы больше, чем при использовании газа в качестве топлива.

Значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха ТЧ вносят строительные работы (дорожное строительство, внешняя отделка, возведение зданий).

Авторами [32] проведено исследование влияния метеорологических параметров (температуры, влажности, скорости ветра) и влажности материала на количество выбрасываемой пыли. Определено, что наибольшее влияние на выброс загрязняющих веществ оказывает его влажность, которая определяется метеорологическими параметрами окружающей среды. Образование

частиц пыли при работах по строительству дорожного полотна составляет 22,86 кг пыли/день.

В работе [33, 34] с помощью недорогого датчика Alphasense OPC N2 определено количество пылевых частиц, образующихся при проведении строительных работ внутри помещений. Измерения производились при смешивании, разливке строительного раствора (песок, цемент). С помощью Alphasense OPC N2 авторами [33] получены следующие концентрации пылевых частиц при смешении, разливке строительного раствора: PM10 — 3522,62 мкг/м³, PM2,5 — 236,46 мкг/м³, PM1 — 47,62 мкг/м³ (усредненные значения за весь период измерений).

В [35] посредством моделирования процесса диффузии ТЧ на строительной площадке получены удельные показатели выброса для следующих источников: земляные работы TSP = 0,0495 г/м²·ч, строительство фундамента TSP = 0,0222 г/м²·ч, строительство подъемной опалубки — 0,0161 г/м²·ч, складской двор — 0,0195 г/м²·ч.

К естественным источникам выброса ТЧ в атмосферный воздух относятся пыльные бури, морские аэрозоли, взвеси и обломки почвы. Авторами [36, 37] рассмотрены механизмы образования пыльных бурь, их влияние на окружающую среду и здоровье человека, прогнозирование пыльных бурь (спутниковые снимки, модели).

В работе [38] рассмотрен процесс образования морских аэрозолей, их поступление в атмосферный воздух и произведена классификация морских аэрозолей по типам. Первый тип — первичные аэрозоли, образованные брызгами, содержащими морскую соль. Данный тип аэрозолей составляет большую часть массы всех образующихся морских аэрозолей. Второй тип — первичные сульфатные морские аэрозоли, образуются в результате выбросов биогенного диметилсульфида (фитопланктон), вулканической деятельности. Представленный тип морского аэрозоля имеет наибольшее распределение по количеству частиц в атмосфере. Третий тип — вторичные нитратные морские аэрозоли, источниками которых являются процессы сжигания топлива, биомассы с последующей фотохимической реакцией исходных компонентов и образованием азотной кислоты, удалении ее из атмосферы посредством мокрого осаждения.

Определение гигроскопичного соединения в атмосферном воздухе

В настоящее время на территории Волгограда функционируют 5 станций мониторинга состояния атмосферного воздуха (№№ 49582, 39510, 39494, 39512, 39508) Sensor Community. Такая станция включает в себя датчик частиц Nova SDS011 и датчик температуры, влажности, атмосферного давления BME 280 (3.3 V) (рис. 2).

В [39] представлен ряд аналитических уравнений описывающих гигроскопический рост частиц:

$$C(RH) = 1 + \frac{\frac{k}{1,65}}{-1 + \frac{1}{a_w}}, \quad (1)$$

$$PM(\text{Corrected}) = \frac{PM(\text{Raw})}{C}, \quad (2)$$

где $C(RH)$ — кратность увеличения массовой концентрации; a_w — активность воды, определяемая из соотношения $RH/100$; k — статистически полученное значение (коэффициент k -Келлера); $PM(\text{Raw})$ — концентрация пылевых частиц без обработки; C — концентрация пылевых частиц после обработки.



Рис. 2. Общий вид датчиков:
 a — датчик частиц Nova SDS011; b — датчик Bosch BME 280 (3.3 V)

На рисунках 3, 4 представлена кратность роста концентрации частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в зависимости от относительной влажности.

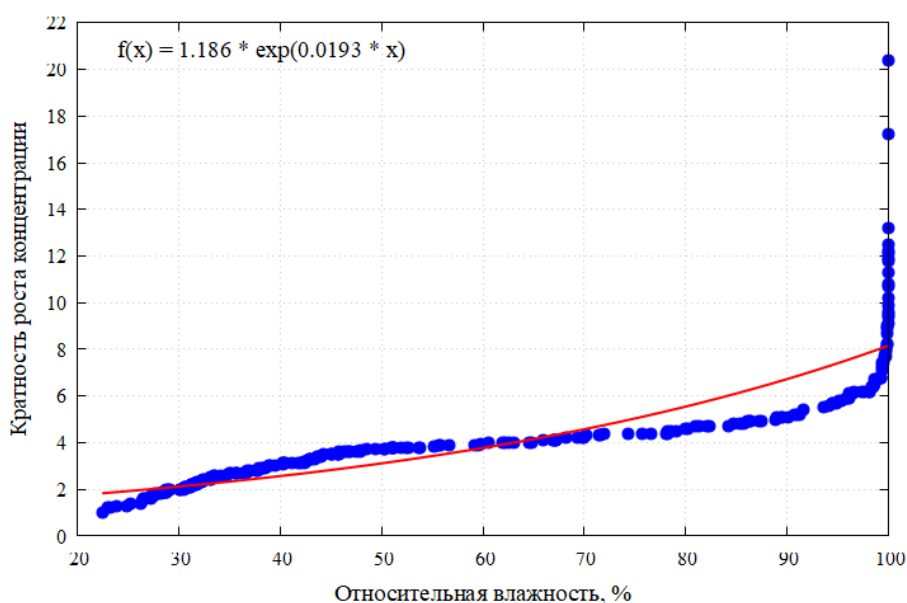


Рис. 3. Кратность роста концентрации частиц $PM_{2,5}$ в зависимости от относительной влажности

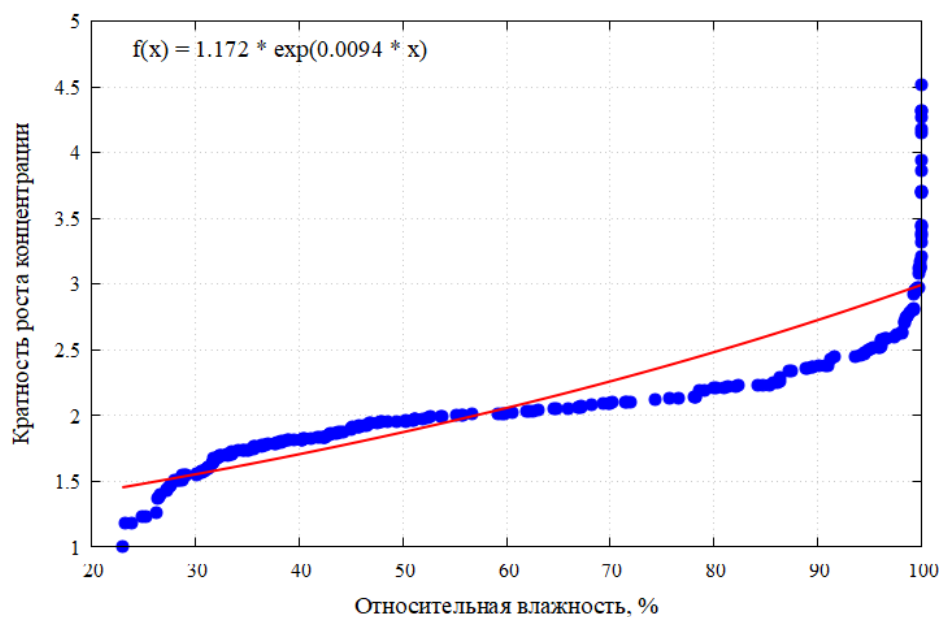


Рис. 4. Кратность роста концентрации частиц PM10 в зависимости от относительной влажности

Достаточно очевидно, что концентрация ТЧ в зависимости от относительной влажности растет экспоненциально. При этом в значительно большей степени гигроскопический фактор роста частиц сказывается на PM2,5, чем на PM10.

Используя уравнение (1) можно определить наиболее подходящее гигроскопическое соединение, воздействующее на ОКН. В источниках [7, 40] приводятся значения коэффициента k -Келлера (табл. 2).

Таблица 2

Значение коэффициента k -Келлера для гигроскопичных соединений

Химическое соединение	Коэффициент k -Келлера	Ссылка
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,61	[7]
NH_4NO_3	0,67	[7]
NaCl	1,28	[7]
NaNO_3	0,88	[40]
NaHSO_4	0,91	[40]
Na_2SO_4	0,8	[40]

Функции гигроскопического роста фракций (PM2,5, PM10) и функции роста концентраций частиц гигроскопичных соединений представлены на рис. 5, 6.

На основании представленных функций роста гигроскопичных соединений и фракций (PM10, PM2,5) можно определить, что наиболее вероятным гигроскопичным соединением для PM2,5 является NaCl, а для PM10 — $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

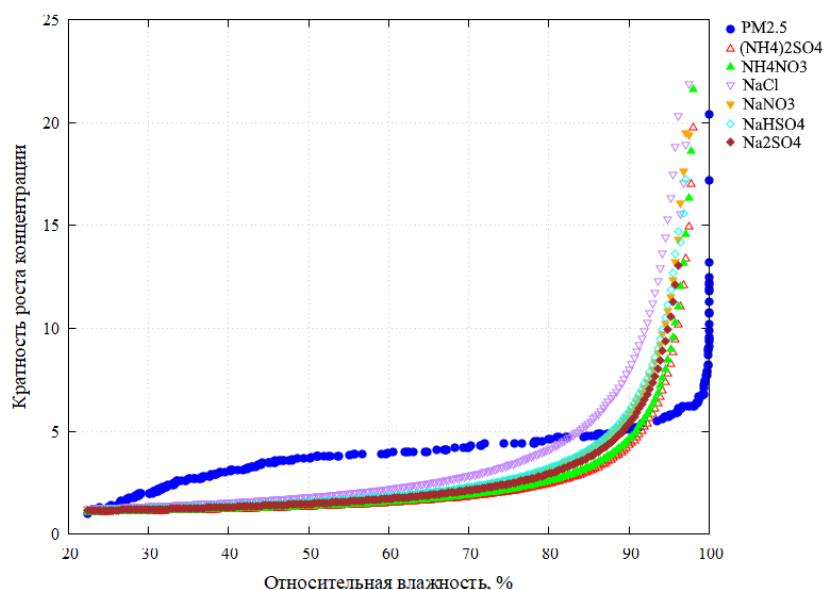


Рис. 5. Кратность роста гигроскопичных соединений и фракции PM2,5

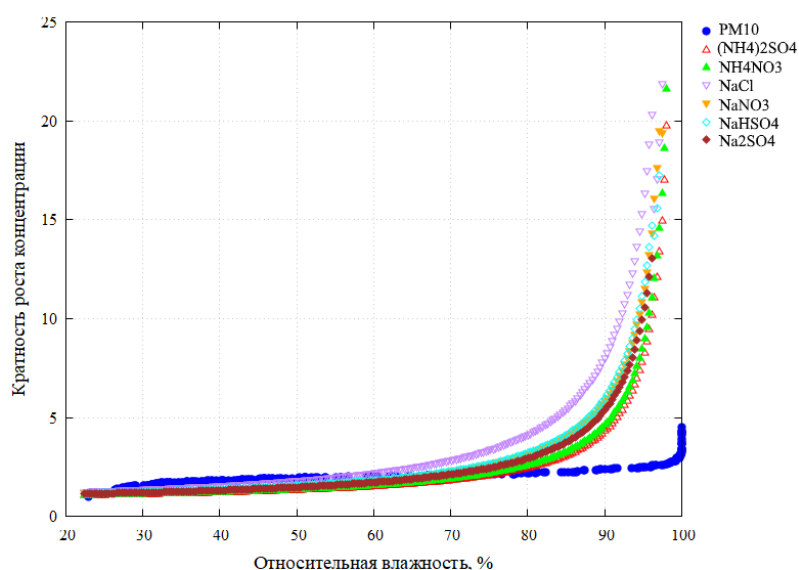


Рис. 6. Кратность роста гигроскопичных соединений и фракции PM10

Влияние гигроскопичных соединений NaCl и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ на объекты культурного наследия

Как правило, основным материалом ОКН является натуральный камень. Специфическое воздействие различных загрязняющих агентов на натуральный камень зависит от их химического состава: от изменения цвета текстуры до эрозионных процессов [41]. При этом не исключено комбинированное воздействие солей и факторов окружающей среды на натуральный камень, например, в [42] описан процесс солевого выветривания натурального камня.

В [43] авторами произведено исследование эрозионной способности ряда солей в процессе их гидролиза и определено, что хлорид натрия является наименее эффективной солью с точки зрения течения эрозионного процесса. При этом в [41] подчеркивается, что, несмотря на низкую агрессивность NaCl в проведенных лабораторных экспериментах, в реальных условиях, как правило, из-за своей распространенности и, особенно при использовании в зимний период для борьбы с обледенением он оказывает большее воздействие на натуральный камень, чем другие соли. В работе [44] авторами подчеркивается, что воздействие NaCl, в отличие от других типов солей, значительно из-за минимального времени его растворения (30 мин), кроме того, частая смена циклов кристаллизации и растворения приводит к ослаблению межзерновых связей в камне.

Аммониевые соли, в отличие от NaCl, являются более агрессивными, по отношению к катализации эрозионных процессов натурального камня. В работе [45] исследовано влияние NH_3^+ на ОКН и определено, что разрушение натурального камня происходит при окислении аммиака микроорганизмами (аммиакоокисляющие археи). В [46] определено, что использование биоцидов на основе аммониевых солей для обработки натурального камня приводит к потере гидрофобности и изменению водопоглощения камня.

Выводы

На основании проведенного исследования определено, что загрязнение атмосферного воздуха Волгограда гигроскопичными соединениями в значительной степени может воздействовать на ОКН. При этом исследуемые соединения представляют собой вторичные частицы, образованные в результате протекающих в атмосферном воздухе химических реакций. На основании проведенного исследования можно определить следующее:

- 1) наиболее вероятными гигроскопичными соединениями, оказывающими воздействие на ОКН для PM_{2,5} является NaCl, а для PM₁₀ — $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$;
- 2) значительная доля частиц по массе характерна для режимов накопления, грубый, в то время как максимальное количество частиц наблюдается в режимах Эйткена, нуклеации;
- 3) воздействие ТЧ на ОКН главным образом определяется массой, а не количеством, поэтому в представленном исследовании рассмотрено воздействие только частиц режимов накопления, грубого;
- 4) вторичные частицы, в отличие от первичных частиц, как правило, преобладают в городской среде, их состав определяют антропогенные источники выброса;
- 5) оптический метод определения характеристик ТЧ является наиболее информативным, кроме того, его можно автоматизировать путем интеграции датчиков частиц в систему ИОТ;
- 6) NaCl является наименее эффективной солью с точки зрения протекания эрозионного процесса. При этом из-за своей распространенности, особенно в зимний период, NaCl способен оказывать большее воздействие, чем другие соли;
- 7) аммониевые соли, в отличие от NaCl, являются более агрессивными по отношению к катализации эрозионных процессов натурального камня. Разрушение натурального камня происходит при окислении аммиака микро-

организмами (аммиакоксилирующие археи). Кроме того, воздействие аммониевых солей на натуральных камень приводит к потере его гидрофобности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Di Antonio A.* Development of novel methodologies for utilizing low-cost sensors for ambient Particulate Matter measurement. Apollo — University of Cambridge Repository <https://doi.org/10.17863/CAM.68376>. 2020. DOI: 10.17863/CAM.68376.
2. *Young D. E.* Characterisation of the Chemical Properties and Behaviour of Aerosols in the Urban Environment. PhD thesis. The University of Manchester. 2014. P. 246.
3. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc. 2006. P. 1149.
4. *Zhang X.* Characterization of particle number size distribution and new particle formation in an urban environment in Lanzhou, China // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 103. Pp. 53—66.
5. *Wehner B.* Long term measurements of submicrometer urban aerosols: Statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 3. Pp. 867—879.
6. *Kanawade V. P.* Chemical Characterisation of Sub-micron Aerosols During New Particle Formation in an Urban Atmosphere // *Aerosol Air Qual. Res.* 2020. Pp. 1294—1305.
7. Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter / A. Di Antonio, O. Popoola, B. Ouyang, J. Saffell, J. Jones // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 9. DOI: 10.3390/s18092790.
8. *Amaral S.* An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments // *Atmosphere*. 2015. Vol. 6. Pp. 1327—1345.
9. *Ding T.* A comparative study of morphological characteristics of medium-density fiberboard dust by sieve and image analyses // *Journal of Wood Science*. 2020. Vol. 66. DOI: 10.1186/s10086-020-01896-x.
10. *Obaidullah M.* A review on particle emissions from small scale biomass combustion // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012. Vol. 2. Pp. 147—159.
11. *Giechaskiel B.* Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number // *Journal of Aerosol Science*. 2014. Vol. 67. Pp. 48—86.
12. *Brattich E.* How to Get the Best from Low-Cost Particulate Matter Sensors: Guidelines and Practical Recommendations // *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 3073. DOI: 10.3390/s20113073.
13. *Peters T.* Comparison of the GRIMM 1.108 and 1.109 Portable Aerosol Spectrometer to the TSI 3321 Aerodynamic Particle Sizer for Dry Particles // *The Annals of Occupational Hygiene*. 2006. Vol. 50. Pp. 843—850. DOI: 10.1093/annhyg/mel067.
14. *Bezantakos S.* Modification of the TSI 3081 Differential Mobility Analyzer to include three Monodisperse Outlets: Comparison between experimental and theoretical performance // *Aerosol Science and Technology*. 2016. Vol. 50. DOI: 10.1080/02786826.2016.1227060.
15. *Fleming J.* The application of low-cost sensors to monitor and characterise particulate matter air pollution. 2024. DOI: 10.17863/CAM.112804.
16. *Krause A.* Using novel portable air quality monitors to improve personal exposure and dose estimations for health studies. University of Cambridge. 2020. DOI: 10.17863/CAM.64122.
17. *Zielinski A. T.* Development and implementation of a microresonator impactor for atmospheric particulate sensing. PhD thesis. University of Cambridge. 2018.
18. Size-Resolved Field Performance of Low-Cost Sensors for Particulate Matter Air Pollution / E. Molina Rueda, E. Carter, C. L'Orange, C. Quinn, J. Volckens // *Environmental Science & Technology Letters*. 2023. Vol. 10. Iss. 3. Pp. 247—253. DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00030.
19. *Pöschl U.* Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects // *Angewandte Chemie*. 2005. Vol. 44. Iss. 46. P. 7520.
20. *Kalliat T., Raghava R.* Atmospheric Aerosols ACS Symposium Series // American Chemical Society. 2009. P. 1005.
21. *Colbeck I., Lazaridis M.* Aerosols and environmental pollution // *Die Naturwissenschaften*. 2009. Vol. 97. P. 117.
22. *Selahattin I., Ulas I.* Pollution in Megacities: A case study of Istanbul // *Air Pollution — Monitoring, Modelling and Health*. 2012. P. 41.
23. *Barouch G.* Contribution of Road Vehicle Tyre Wear to Microplastics and Ambient Air Pollution // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Iss. 2. Pp. 1—31.

24. *Bielaczyc P.* Exhaust emissions of particulate matter from light-duty vehicles — an overview and the current situation // *Combustion Engines*. 2017. Vol. 171. Pp. 227—238.
25. *Manshausen P.* Pollution tracker: Finding industrial sources of aerosol emission in satellite imagery // *Environmental Data Science*. 2023. P. 8.
26. *Volná V.* Identification of Causes of Air Pollution in a Specific Industrial Part of the Czech City of Ostrava in Central Europe // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. P. 21.
27. *Mishra R.* The production, characterization and applications of nanoparticles in the textile industry // *Textile Progress*. 2014. Vol. 46. P. 96.
28. *Andreae M.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning — an updated assessment // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Pp. 8523—8546.
29. *Paluang P., Thavornitam W., Phairuang W.* The Spatial-Temporal Emission of Air Pollutants from Biomass Burning during Haze Episodes in Northern Thailand // *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 122.
30. *Danuta P.-M., Slawomir R.* Methods for reducing low emissions from heating devices in single-family housing // *E3S Web Conf*. 2018. Vol. 45.
31. *Butt E.* The impact of residential combustion emissions on atmospheric aerosol, human health and climate // *Atmospheric chemistry and physics*. 2016. Vol. 16. Pp. 873—905.
32. *Qi Jia.* Measurement of dust emission from a road construction using exposure-profiling method // *Natural Science*. 2013. Vol. 5. P. 1255—1263.
33. *Khan M.* Environmental Particulate Matter (PM) Exposure Assessment of Construction Activities Using Low-Cost PM Sensor and Latin Hypercube Technique // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Pp. 7797.
34. *Cheriyen D., Jae-Ho C.* Data on different sized particulate matter concentration produced from a construction activity // *Data in brief*. 2020. Vol. 33.
35. *Luo Q.* Occupational health risk assessment based on dust exposure during earthwork construction // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. Pp. 103186.
36. *Nazari S.* The origins and sources of dust particles, their effects on environment and health, and control strategies: a review // *Journal of Air Pollution and Health*. 2016. Vol. 1. Pp. 137—152.
37. *Long X.* Effect of ecological restoration programs on dust concentrations in the North China Plain: A case study // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18. Pp. 6353—6366.
38. *Saltzman E.* Marine Aerosols // *UC Irvine. Report*. 2009. Vol. 3. P. 35.
39. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring / L. R. Crilley, M. Shaw, R. Pound, L. J. Kramer, R. Price, S. Young, A. C. Lewis, F. D. Pope // *Atmos. Meas. Tech*. 2018. Vol. 11. Pp. 709—720.
40. Global distribution of the effective aerosol hygroscopicity parameter for CCN activation / K. J. Pringle, H. Tost, A. Pozzer, U. Pöschl, J. Lelieveld // *Atmos. Chem. Phys*. Vol. 10. Pp. 5241—5255. DOI: 10.5194/acp-10-5241-2010.
41. *Alves C., Figueiredo C. A. M., Sanjurjo-Sánchez J., Hernández A. C.* Salt Weathering of Natural Stone: A Review of Comparative Laboratory Studies // *Heritage*. 2021. Vol. 4. Pp. 1554—1565. DOI: 10.3390/heritage4030086.
42. *Oguchi C. T., Yu S.* A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage // *Prog. Earth Planet. Sci*. 2021. Vol. 8. Iss. 32. DOI: 10.1186/s40645-021-00414-x.
43. *Nord A. G.* Efflorescence salts on weathered building stone in Sweden // *Geol. Föreningen I Stockh. Förhandlingar* 1992. Vol. 114. Pp. 423—429.
44. *Godts S., Orr S. A., Desarnaud J.* NaCl-related weathering of stone: the importance of kinetics and salt mixtures in environmental risk assessment // *Herit Sci*. 2021. Vol. 9. Iss. 44. DOI: 10.1186/s40494-021-00514-3.
45. Higher diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea than bacteria detected at the Bayon Temple of Angkor Thom in Cambodia / H. Meng, L. Luo, H. Chan, Y. Katayama, Ji-D. Gu // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2016. Vol. 115. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.08.021.
46. Water repellent and biocide treatments: assessment of the potential combinations / C. Moreau, V. Verges-Belmin, L. Leroux, G. Oriol, G. Fronteau, V. Barbin // *J. Cult. Heritage*. 2008. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 394—400.

© Черепанов В. Ю., Чурикова В. И., Лупиногин В. В., Лясин Р. А., 2025

Поступила в редакцию
16.06.2025

Ссылка для цитирования:

Черепанов В. Ю., Чурикова В. И., Лупиногин В. В., Лясин Р. А. К вопросу воздействия твердых частиц, содержащих в своем составе гигроскопичные соединения, на объекты культурного наследия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 196—208. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_196.

Об авторах:

Черепанов Вадим Юрьевич — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gsm_2010@mail.ru

Чурикова Валерия Игоревна — канд. техн. наук, ст. препод. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; vachurikova@yandex.ru

Лупиногин Владислав Владимирович — канд. техн. наук, ст. препод. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; smist2012-2013@yandex.ru

Лясин Роман Андреевич — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; roman.lyasin@mail.ru

Vadim Yu. Cherepanov, Valeria I. Churikova, Vladislav V. Lupinogin, Roman A. Lyasin

Volgograd State Technical University

**ON THE IMPACT OF SOLID PARTICLES CONTAINING HYGROSCOPIC COMPOUNDS
ON CULTURAL HERITAGE OBJECTS**

As a rule, all atmospheric aerosols are organic, i. e. they contain carbon (C), as well as inorganic compounds ((NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, NaCl) and inorganic elements (SO₄, NH₄, NO₃). With the dry deposition method, mechanical wear of the settling surface occurs due to the irregular shape of the particles. The corrosion processes of materials of cultural heritage sites, with the wet method of removing solid particles from atmospheric air, are characterized by their chemical composition and hygroscopicity.

Key words: PM10, PM2.5, cultural heritage site, adhesion, atmospheric air, solid particles, precipitation, pollution of buildings, hygroscopicity, salts, acids.

For citation:

Cherepanov V. Yu., Churikova V. I., Lupinogin V. V., Lyasin R. A. [On the impact of solid particles containing hygroscopic compounds on cultural heritage objects]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 196—208. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_196.

About authors:

Vadim Yu. Cherepanov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gsm_2010@mail.ru

Valeria I. Churikova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; vachurikova@yandex.ru

Vladislav V. Lupinogin — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; smist2012-2013@yandex.ru

Roman A. Lyasin — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; roman.lyasin@mail.ru