

УДК 628.511:728.2.05

В. Ю. Черепанов, В. В. Лупиногин

Волгоградский государственный технический университет

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ФАСАДЫ ЗДАНИЙ — ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Рост промышленного производства и активная урбанизация приводят к увеличению количества загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух. Твердые частицы (пыль) способны оказывать прямое или косвенное воздействие на состояние объектов культурного наследия. При прямом воздействии происходит механическое истирание поверхности, наблюдаются коррозионные процессы, обусловленные образованием кислот из солей. Косвенное воздействие характеризуется изменением климатических условий, которое определяется тремя видами взаимодействия «аэрозоль — излучение»: рассеяние, поглощение входящего и исходящего излучения.

Ключевые слова: объект культурного наследия, атмосферный воздух, пылевые частицы, адгезия, PM_{10} , $PM_{2,5}$, соли, кислоты, осаждение частиц, режимы распределения частиц.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха твердыми частицами в последние годы становится одной из серьезных угроз, которая влияет на социальное и экологическое благополучие населения. Воздействие пыли на организм человека определяется ее диаметром, концентрацией, химическим составом и продолжительностью воздействия.

Всемирной организацией здравоохранения установлены нормативы среднегодовой концентрации твердых частиц¹: $PM_{2,5}$ — 10 мкг/м³, PM_{10} — 20 мкг/м³, для среднесуточной концентрации $PM_{2,5}$ — 25 мкг/м³, PM_{10} — 50 мкг/м³. В зависимости от диаметра частицы могут оседать в носоглоточной, трахеобронхиальной, альвеолярной областях (при отсутствии носового дыхания). Так, частицы диаметром от 2,5 до 10 мкм оседают в носоглоточной области, в то время как частицы диаметром не более 2,5 мкм попадают в альвеолярную область и вызывают пневмокониоз, воспаление легких [1].

Воздействие твердых частиц на фасады зданий, являющихся объектами культурного наследия, определяется рядом факторов, среди которых стоит выделить следующие: наличие пылезащитных зеленых насаждений, источник выброса (передвижной, стационарный), вид твердых частиц (первичные, вторичные), форма застройки и здания, климатические параметры (скорость, направление ветра, температура, относительная влажность, количество осадков), характеристики твердых частиц (химический состав, размер, гигроскопичность, растворимость) [2—5].

Твердые частицы, поступающие в атмосферный воздух, как правило, являются вторичными, т. е. образованными в результате гетерогенного зародышеобразования. Дисбаланс в сторону определенных источников загрязнения атмосферного воздуха определяется промышленной ориентированностью,

¹ WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2,5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide / World Health Organization. Geneva, 2021. P. 300.

развитием транспортной инфраструктуры и метеорологическими параметрами рассматриваемой территории. Характер воздействия образованных частиц определяется комбинацией исходных реагентов и их концентраций.

Следовательно, можно выделить ряд факторов, оказывающих влияние на качество атмосферного воздуха, а в дальнейшем и на здания — объекты культурного наследия (рис. 1).

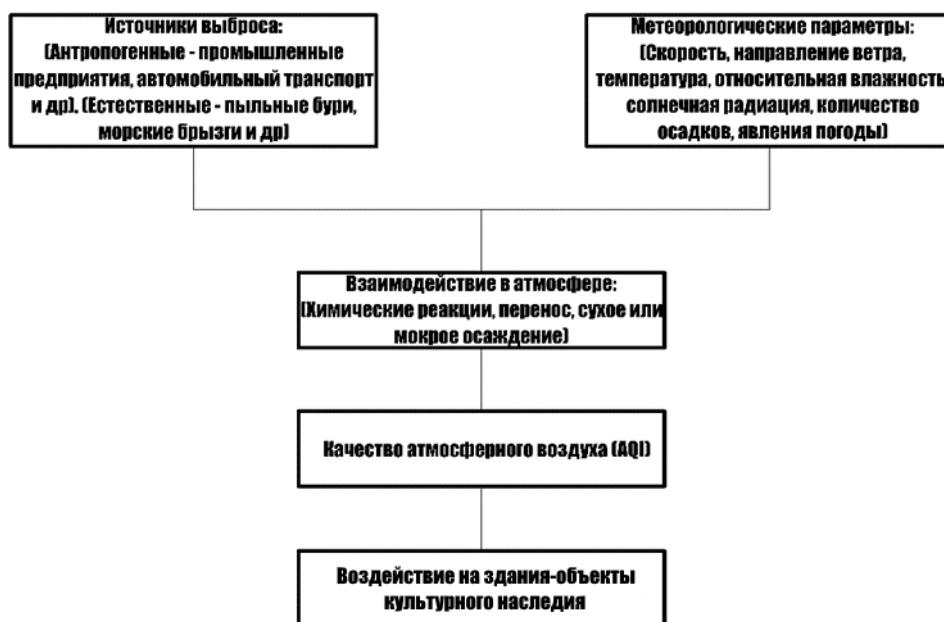


Рис. 1. Параметры, оказывающие влияние на состояние атмосферного воздуха [6]

Целью данного исследования является изучение влияния загрязнения атмосферного воздуха на состояние фасадов зданий, являющихся объектами культурного наследия.

Режимы распределения частиц в атмосферном воздухе от различных источников

Аэрозоль, образованный в результате загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами, можно классифицировать исходя из его граничного диаметра. В работах авторов² [7, 8] выделены следующие режимы распределения частиц: нуклеации, Эйткена, накопления, грубый. На рис. 2 представлена упрощенная схема распределения твердых частиц (по количеству и массе) в атмосферном воздухе.

На основании данных [6] о состоянии атмосферного воздуха в Волгоградской области можно выделить следующие источники загрязнения атмосферного воздуха на территории Волгограда.

Предприятия тяжелой промышленности: АО «Корпорация „Красный Октябрь“» (изготовление прокатной нержавеющей стали, Краснооктябрьский район), АО «ФНПЦ „Титан-Баррикады“» (производство металлических

² Young D. E. Characterization of the chemical properties and behaviour of aerosols in the urban environment : PhD thesis. The University of Manchester, 2014. P. 246.

конструкций, Краснооктябрьский район), АО «Каустик» (производство неорганических химических веществ, Красноармейский район), ОАО «Волгограднефтемаш» (производство нефтегазового оборудования, Советский район), АО «РУСАЛ Урал», филиал «РУСАЛ Волгоград» (производство алюминия из глинозема, Тракторозаводский район), ООО «Радуга Цинк Лист» (нанесение полимерного покрытия на прокат оцинкованной стали, Красноармейский район) [6].

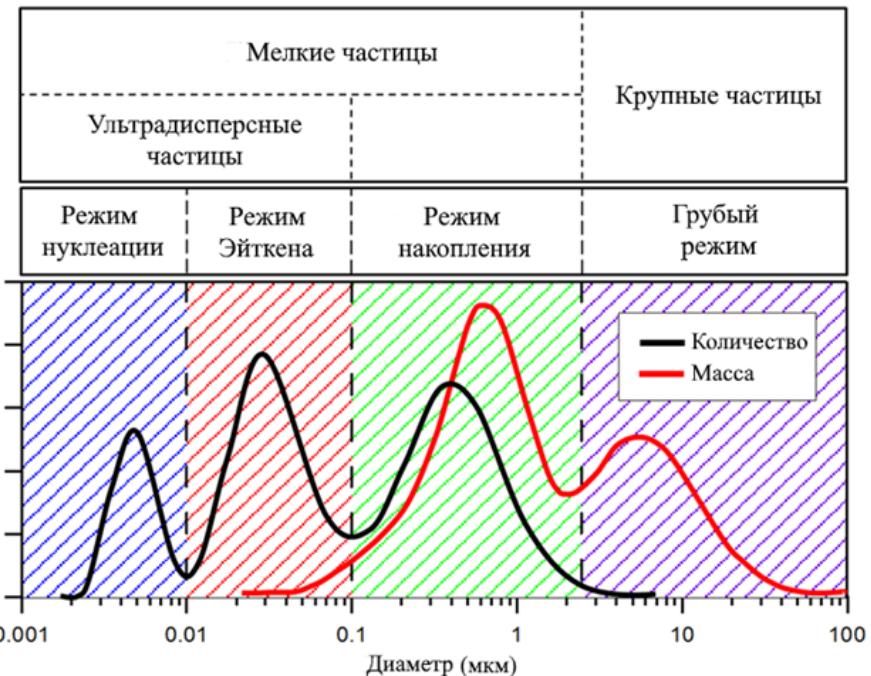


Рис. 2. Упрощенная схема распределения частиц по количеству и массе в атмосферном воздухе [7]

Предприятия легкой промышленности: ООО «ПО „Шеврет“» (производство изделий из кожи, Советский район), ООО «ВИТ» (производство лакокрасочных изделий, Городищенский район), ООО «Корпорация „ВОЛМА“», филиал «Крона Рециклинг» (утилизация и переработка бумажных отходов, Тракторозаводский район), «Вторматик» (пункты приема вторсырья).

Строительные работы (за последние 10 лет): возведение жилищных комплексов в Ворошиловском районе — ЖК «Династия», ЖК «Маяковский», проект «Урбан», ЖК «Гала Парк», ЖК «Бух», ЖК «Фаренгейт», ЖК «Академический» и др., в Центральном районе — ЖК «Машковъ», ЖК «Репников», ЖК «Цех», ЖК «Арбат», ЖК «5 Вершин» и др.

Транспортные средства: по данным Росприроднадзора [6], в значительной степени преобладают выбросы от автомобильного транспорта (76,8 тыс. т), в отличие от железнодорожного (2,7 тыс. т).

Согласно данным Росприроднадзора [6], в структуре источников выбросов преобладают стационарные, среди которых в определенном соотношении выделяются следующие виды деятельности (рис. 3).

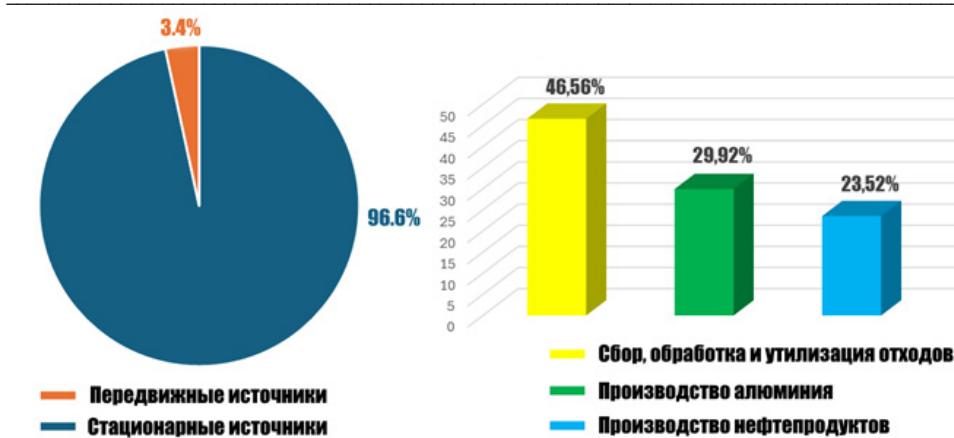


Рис. 3. Соотношение количества выбросов (ЗВ) от стационарных и передвижных источников, состав выбросов стационарных источников, характерных для Волгоградской области

На основании данных [6] можно определить, что наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят стационарные источники, в то время как вклад передвижных источников (автомобильный, железнодорожный транспорт) минимален и локализован в пределах трех крупных автомагистралей (1-, 2- и 3-я продольные магистрали). Среди стационарных источников лидирующие позиции по количеству выбросов занимают следующие виды деятельности: сбор, обработка и утилизация отходов (46,56 %), производство алюминия (29,92 %), нефтепродуктов производство (23,52 %).

Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха, ввиду географического положения Волгограда, вносят естественные источники (степной аэрозоль, морской аэрозоль) [9, 10] (рис. 4).

Количество выбросов твердых частиц естественного происхождения определяется поверхностной нагрузкой, состоянием поверхности и метеорологическими параметрами (относительная влажность, скорость ветра), пылеобразующей способностью частиц. При этом на количество выбрасываемых частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в большей степени влияет детальное распределение частиц, чем их геометрический диаметр [13—17]. На рис. 5 представлено распределение размеров твердых частиц в зависимости от источника выброса.

На основании данных из работ [13—17] достаточно хорошо видно, что преобладающая доля частиц, поступающая от источников выброса в атмосферный воздух, имеет диаметр, не превышающий 10 мкм (исключение — производство алюминия, пыльные бури, строительные работы). При этом на основании представленного количественного распределения частиц по размерам можно утверждать, что массовая доля для частиц диаметром более 10 мкм будет минимальна, за исключением некоторых источников.

Стоит учитывать, что время нахождения твердых частиц во взвешенном состоянии определяется диаметром, плотностью, формой частиц, метеорологическими параметрами (скорость ветра, относительная влажность). В свою очередь, диаметр частиц вкупе с метеорологическими параметрами определяет радиус зоны рассеивания, характеризующим показателем которой является скоростью оседания. Так как скорость оседания частиц малого диаметра

минимальна, а радиус их зоны рассеивания значительно больше, чем для частиц диаметром более 10 мкм, можно утверждать, что воздействие таких частиц локализовано [18, 20].

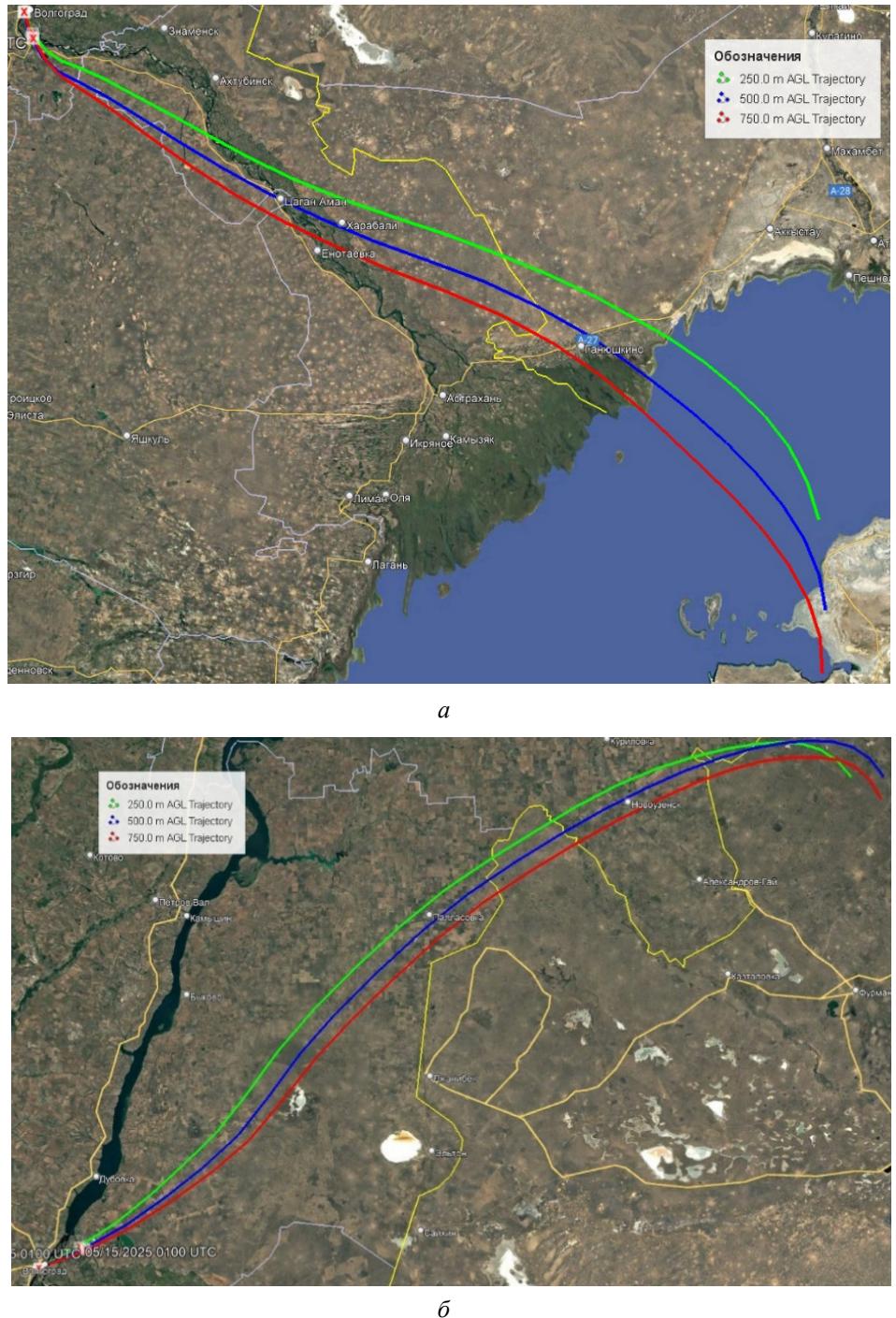


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс для Волгограда (HYSPLIT) [11, 12]: *а* — морской аэрозоль; *б* — степной аэрозоль

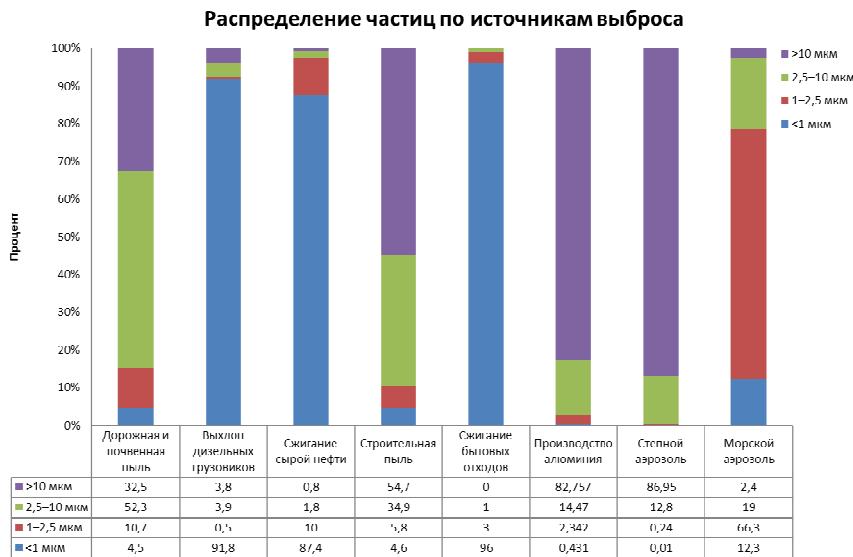


Рис. 5. Распределение частиц по диаметрам для различных источников выброса (по данным [13—17])

Поэтому с точки зрения оценки воздействия твердых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия стоит рассматривать частицы $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} , режим накопления грубый.

Воздействие пылевых отложений на фасады зданий — объектов культурного наследия

Фасад является элементом ограждающей конструкции здания, который служит барьером между внешней и внутренней средой здания. Он обеспечивает защиту внутренней среды здания и его устойчивость к атмосферным явлениям, акустическому и термическому воздействию внешней среды. Для улучшения визуального вида фасадов зданий и их защиты от воздействия факторов внешней среды используют облицовочные материалы [20].

Как правило, здания — объекты культурного наследия в Волгограде состоят из красного и/или белого силикатного кирпича, который покрыт облицовочным материалом. В качестве облицовочных материалов используется фасадная краска, штукатурка, силикатная плитка [21].

На здание — объект культурного наследия оказываются следующие виды воздействия, обусловленные косвенным и прямым влиянием твердых частиц (рис. 6).

Воздействие пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия может осуществляться путем изменения климатических параметров (косвенное) и коррозионных, механических процессов (прямое). При косвенном воздействии происходит изменение метеорологических параметров, обусловленное рассеянием, поглощением входящего или исходящего излучения твердыми частицами. При прямом воздействии пылевых частиц на фасады зданий происходит механическое истирание поверхности оседания, коррозионное выветривание материала фасада вследствие гидролиза солей. Стоит выделить следующие виды влияний при косвенном и прямом воздействии пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия (табл.).

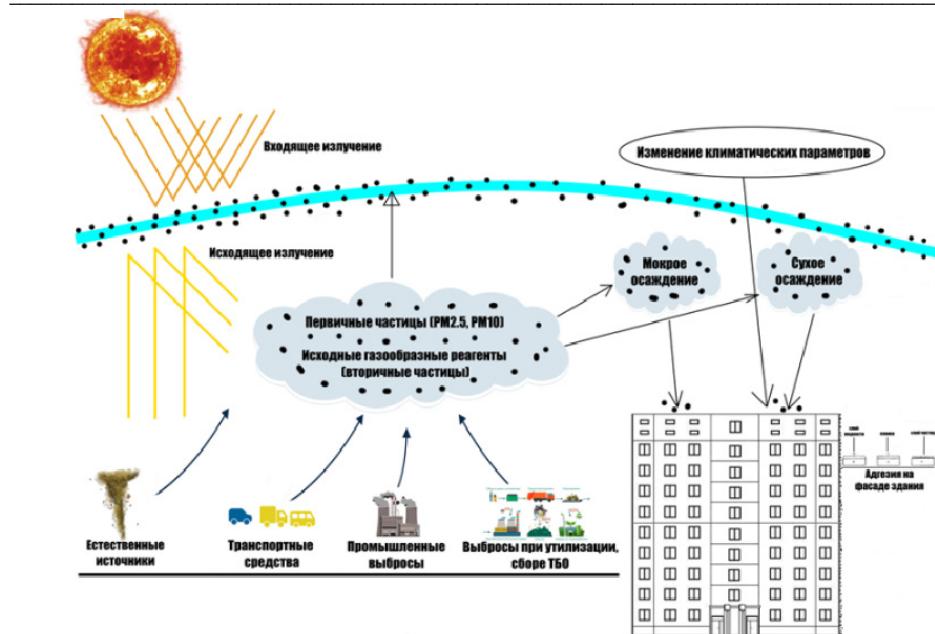


Рис. 6. Влияние пылевых частиц на фасад здания — объекта культурного наследия

*Виды воздействия пылевых частиц
на фасады зданий — объектов культурного наследия*

Характеристика воздействия	Последствия воздействия	Ссылка
Подавление слабых (< 25 мм/сут) и увеличение сильных (> 25 мм/сут) осадков	Растворение элементов искусственного камня	[22]
Поглощение солнечного излучения частицами, содержащими в составе SO_4^{2-}	Возникновение более суровых погодных условий (сильные порывы ветра), выветривание и механическое истирание	[23]
Снижение температуры ввиду наличия поглощающих излучение твердых частиц углерода (C) в атмосферном воздухе, увеличение относительной влажности	Повышенная относительная влажность способствует развитию грибков и микроорганизмов, приводящих к деградации материалов	[24]
Повышение температуры и увеличение количества осадков	Усиление коррозионных процессов карбонатного камня	[25]
Увеличение ветровой нагрузки ввиду загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами	Усиление эрозионной нагрузки вследствие осаждения фторидов и хлоридов	[26]
Рассеяние солнечного излучения твердыми частицами	Изменение цвета фасада здания, вызванное биоповреждением	[26]
Возникновение сильных порывов ветра	Перенос дыма и пыли от транспортных средств на здание	[26]
Резкое изменение температуры	Возникновение эрозионных процессов вследствие расширения и сжимания материала	[26]

Характеристика воздействия	Последствия воздействия	Ссылка
Гидролиз солей — вторичных частиц, содержащих CO_2 , NO_x , SO_x	Растворение карбонатного камня, образование черных корок	[27, 28]
Соловое выветривание, смещение фазы относительной влажности	Увеличение циклов растворение/кристаллизация, деградация материала	[29]
Осаждение твердых частиц на поверхности	Образование черных корок, гидролиз солей	[30]
Воздействие твердых частиц, содержащих NaCl	Минимальное время растворения искусственного камня, ослабление межзерновых связей	[31]
Воздействие твердых частиц, содержащие аммиак NH^{3+}	Коррозионное действие ввиду развития аммиакокисляющих архей. Потеря гидрофобности материала	[32, 33]
Накопление твердых частиц на поверхности фасадов зданий	Увеличение гигроскопичности материала	[4]

Воздействие пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия может осуществляться по двум направлениям: это потеря визуальной составляющей объекта (изменение цвета объекта) и собственно коррозионный процесс составных материалов. Изучением влияния загрязнения фасадов зданий твердыми частицами с точки зрения влияния на визуальное восприятие человека занимается отдельная дисциплина — визуальная экология. При этом коррозионное воздействие пылевых частиц на составные материалы объекта определяется химическим составом. Поэтому для оценки влияния твердых частиц на фасад здания — объекта культурного наследия необходимо знать их химический состав.

Характеристики пылевых частиц и их воздействие на фасады зданий

Для определения дисперсного состава частиц, характерных для жилой зоны, зоны инженерной и транспортной инфраструктуры, использовался анализатор частиц Microtrac S3500. Измерение анализатора Microtrac S3500 основано на принципе лазерной дифракции, в качестве источника света используются три белых лазера, рассеянный свет которых фиксируется фотодетектором. На основании полученных данных в программном обеспечении FLEX можно построить распределение частиц по объему, площади, количеству в интегральной и дифференциальной форме [34].

Представленные графики дисперсного анализа (рис. 7) показывают, что дисперсный состав для указанных зон почти сходен. Наличие большей объемной доли мелкодисперсных частиц для зоны инженерной и транспортной инфраструктуры объясняется распределением частиц в выхлопных газах (см. рис. 5).

Элементный состав пылевых частиц в изучаемых зонах получен с помощью сканирующей электронной микроскопии и представлен на рис. 8.

Представленный элементный состав показывает, что в рассматриваемых зонах он примерно одинаков, за исключением большей весовой доли металлических элементов. При этом такое различие объясняется воздействием автомобильного транспорта на атмосферный воздух (выхлопные и невыхлопные частицы) [35, 36].

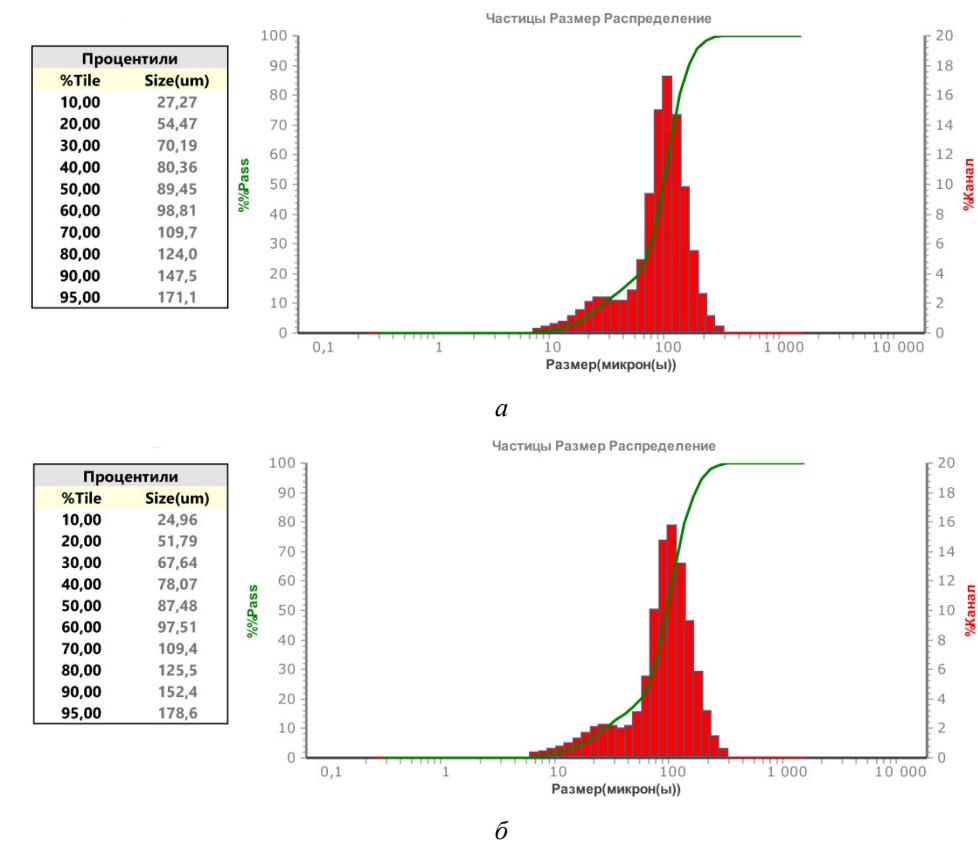


Рис. 7. Распределение частиц по диаметрам в интегральной и дифференциальной форме (объемное): *a* — жилая зона; *б* — зона инженерной и транспортной инфраструктуры

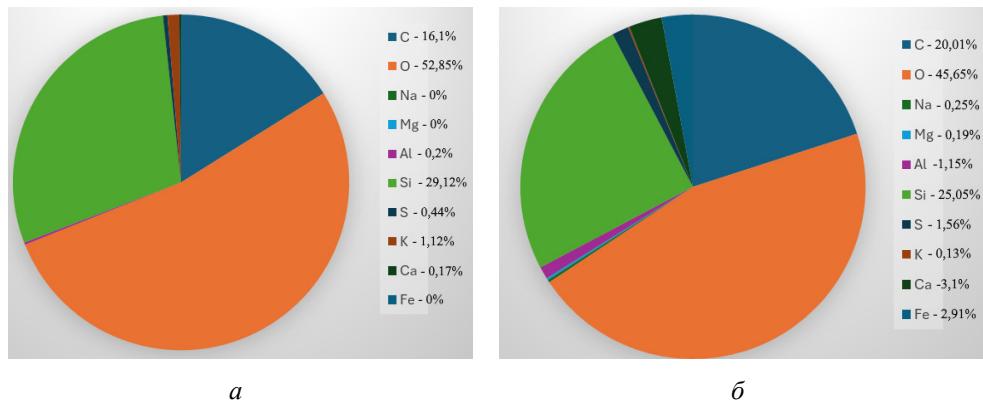


Рис. 8. Элементный состав пылевой навески:
a — жилая зона; *б* — зона инженерной и транспортной инфраструктуры

Стоит выделить следующие виды воздействия химических элементов и соединений, образующихся из них, на здания — объекты культурного наследия. Так, воздействие углекислого газа (CO_2) на силикатный кирпич характе-

ризуется его карбонизацией, которая приводит к увеличению коэффициента размягчения и его повышенной усадке, потери прочности конструкции. Кроме того, углеродные частицы выполняют каталитическую функцию в процессе образования серной и азотной кислот, влияют на цвет фасада [37, 38].

Диоксид серы (SO_2) считается наиболее разрушающим атмосферным агентом, который обладает высокой коррозионной способностью к металлу, способен разрушать поверхностный слой искусственного камня. При взаимодействии с водой превращается в сульфат, в представленном случае коррозионная способность увеличивается в разы, особенно сильно в этом случае страдает карбонатный камень. Образование гипсовых корок на поверхности карбонатного камня приводит к загрязнению фасада здания, страдает его визуальная составляющая [38, 39].

Металлические элементы, содержащиеся в выхлопных газах, переносятся на поверхность фасадов зданий углеродистыми частицами, образуют черную корку. Как правило, образование корок усиливается при высокой относительной влажности [40].

Диоксид кремния (SiO_2) не оказывает прямого коррозионного воздействия на элементы фасада, а, наоборот, используется для повышения коррозионной устойчивости материала. При этом он обладает высокой абразивной способностью, что характеризует его механическое воздействие на фасад здания, особенно при сильных порывах ветра [41].

Хлорид натрия (NaCl) является одной из наименее эрозионно эффективных солей с точки зрения ее воздействия на искусственный камень [42]. При этом в работе [31] уже другими авторами подчеркивается, что воздействие представленной соли с точки зрения коррозионного влияния можно считать значительным ввиду частой смены циклов оттаивания/замораживания, что приводит к разрушению материала.

Заключение

На основании проведенного исследования можно определить, что загрязнение атмосферного воздуха является одним из главных факторов риска, который приводит к разрушению фасадов зданий — объектов культурного наследия.

Стоит выделить следующие специфические виды воздействия загрязняющих веществ:

- Твердые частицы, поступающие в атмосферный воздух, способны к трем видам взаимодействия «аэрозоль — излучение»: рассеяние, поглощение входящего и исходящего излучения. Так, выброс углеродных твердых частиц (C) приводит к поглощению входящего солнечного излучения, снижается температура и повышается относительная влажность воздуха, что приводит к развитию грибков и микроорганизмов.

- Твердые частицы могут удаляться из атмосферного воздуха путем мокрого или сухого осаждения. При сухом способе осаждения происходит механическое воздействие на поверхность оседания, накопление пылевых частиц на поверхности оседания. При мокром способе осаждения твердые частицы взаимодействуют с газами и оседают в виде капель. Гидролиз твердых частиц, содержащих в своем составе (SO_2), приводит к образованию сернистой кислоты, которая обладает высокой коррозионной способностью по отношению к искусственному камню. Кроме того, искусственный камень

теряет свою визуальную составляющую из-за образования на его поверхности гипсовых корок.

- В зонах инженерной и транспортной инфраструктуры дополнительное воздействие на фасады зданий — объектов культурного наследия оказывают металлические частицы, содержащиеся в выхлопных газах и переносимые на поверхности частиц углерода. Они образуют на поверхности фасадов черную корку, тем самым влияя на визуальную составляющую здания.

- Воздействие углекислого газа (CO_2) на силикатный кирпич характеризуется его карбонизацией, которая приводит к увеличению коэффициента размягчения и его повышенной усадке, уменьшается его прочность. Кроме того, углеродные частицы выполняют каталитическую функцию в процессе образования серной и азотной кислот, влияют на цвет фасада.

- Доксид кремния (SiO_2) не способен оказывать коррозионное воздействие на искусственный камень; наоборот, он используется для защиты от коррозии. При этом он, ввиду высокой абразивной способности, способен вызывать механическое повреждение элементов фасада, особенно при сильных порывах ветра.

- Хлорид натрия (NaCl) считается наименее эрозионно эффективной солью с точки зрения ее воздействия на искусственный камень. При этом, ввиду смещения точки замерзания воды, воздействие на строительный материал увеличивается из-за частых циклов оттаивания/замораживания, что приводит к разрушению материала.

Дисперсный состав в изучаемых зонах примерно одинаков, за исключением наличия большей объемной доли частиц менее 10 мкм в зоне инженерной и транспортной инфраструктуры. Полученное различие объясняется вкладом автомобильного транспорта, в выхлопных газах которого большая доля не превышает 10 мкм.

Элементный состав показывает, что в рассматриваемых зонах он примерно одинаков, за исключением большей весовой доли металлических элементов. Такое различие объясняется воздействием автомобильного транспорта на атмосферный воздух (выхлопные и невыхлопные частицы). При этом для двух рассматриваемых зон наблюдается значительная весовая доля кремния (Si) и углерода (C).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J. An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles // Environmental Health Perspectives. 2005. Vol. 113. Pp. 823—839. DOI: 10.1289/ehp.7339.
2. Maharani R. T., Ekasiwi N. N. S., Samodra F. T. B. Minimizing dust in low rise housing design through surface: a literature review // Journal Sains dan Seni ITS. 2019. Vol. 8. No. 2. P. 7. DOI: 10.12962/j23373520.v8i2.49733.
3. Kuzmichev A. A., Azarov V. N., Kuzmichev A. V. The study of the particulate matter's adhesion regularities on the vertical buildings and structures surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. DOI: 10.1088/1757-899X/913/3/032043.
4. Esteban-Cantillo O. J., Menendez B., Quesada B. Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 921. Pp. 337—341. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170945.
5. Grøntoft T. Estimation of damage cost to building façades per kilo emission of air pollution in Norway // Atmosphere. 2020. Vol. 11. DOI: 10.3390/atmos11070686.
6. О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2024 году : докл. / Е. П. Православнова и др. Волгоград, 2025. 300 с.

7. *Di Antonio A.* Development of novel methodologies for utilizing low-cost sensors for ambient Particulate Matter measurement // Apollo — University of Cambridge Repository. 2020. DOI: 10.17863/CAM.68376.
8. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2006. P. 1149.
9. *Лясин Р. А.* Использование лагранжевой одночастичной модели траекторий hysplit для определения источников естественного загрязнения аэрозольными частицами в г. Волгоград // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы XII Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. конф. молодых исследователей, г. Волгоград, 21—26 апр. 2025. Волгоград, 2025. С. 191—192.
10. *Гаспарян А. С.* Степная зона Волгоградской области как неучтенный источник загрязнения городской воздушной среды мелкодисперсными частицами // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : междунар. науч.-практ. конф., г. Волгоград, 15—16 дек. 2022. Волгоград, 2022. С. 394—399.
11. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system / A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, F. Ngan // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. Vol. 96. Pp. 2059—2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
12. *Rolph G., Stein A., Stunder B.* Real-time environmental applications and display system: READY // Environmental Modelling & Software. 2017. Vol. 95. Pp. 210—228. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.025.
13. Measurement system evaluation for fugitive dust emissions detection and quantification / J. G. Watson, J. C. Chow, L.-W. A. Chen, W. Xiaoliang // Aerosol and Air Quality Research. 2010. Vol. 11. Pp. 331—350. DOI: 10.4209/aaqr.2011.03.0028.
14. Particle size distribution from municipal solid waste burning over National Capital Territory, India / R. Arya, S. Ahlawat, L. Yadav et al. // Environmental Sciences Proceedings. 2022. Vol. 19. DOI: 10.3390/ecas2022-12813.
15. *Сизяков В. М., Власов А. А., Бажин В. Ю., Гембцик В. В.* Причины образования глиноземной пыли в электролитическом производстве алюминия // Зап. Горного ин-та. 2012. Т. 198. С. 207—212.
16. *Гаспарян А. С., Азаров В. Н., Кленин И. С., Азарова М. Д.* Анализ характеристик пыли природного происхождения Нижнего Поволжья // Инженер. вестн. Дона. 2022. № 9(93). С. 200—207.
17. *Saltzman E.* Marine Aerosols // UC Irvine. Report. 2009. Vol. 3. P. 35.
18. *Лясин Р. А., Лутишевин В. В., Евтушенко А. И., Лукьянцева С. В.* Об определении дисперсного состава цементной пыли седиментационным методом при пофракционном осаждении частиц с использованием средств обработки бинарных фотографий // Инженер. вестн. Дона. 2022. № 5(89). С. 658—668.
19. *Сысоева Е. В., Гельманова М. О.* Методы расчета рассеивания загрязняющих веществ в городской атмосфере // Вестн. МГСУ. 2022. Т. 17. № 8. С. 1027—1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045.
20. *Athauda R. S., Asmone A. S., Conejos S.* Climate change impacts on facade building materials: a qualitative study // Sustainability. 2023. Vol. 15. DOI: 10.3390/su15107893.
21. *Литвинова И. Н., Карагодина О. А.* Историко-архитектурное наследие г. Волгограда: знаковые объекты площади Павших Борцов довоенного и военного Сталинграда // Вестн. ВолГУ. Сер. 4. История. Регионоведение. Междунар. отношения. 2021. № 1. С. 238—252. DOI: 10.15688/jvolsu4.2021.1.21.
22. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megalopolis area in China / Y. Wang, Q. Wan, W. Meng, F. Liao, H. Tan, R. Zhang // Atmos. Chem. Phys. 2011. Vol. 11. Pp. 12421—12436. DOI: 10.5194/acp-11-12421-2011.
23. *Li W., Bai X., Pan Z.* Air pollution and its impact on stone heritage sites: mechanisms and mathematical models // Heritage Science. 2025. Vol. 13. DOI: 10.1038/s40494-025-01820-w.
24. *Ling X., Han X.* Aerosol impacts on meteorological elements and surface energy budget over an urban cluster region in the Yangtze River delta // Aerosol and Air Quality Research. 2019. Vol. 19. Pp. 1040—1055. DOI: 10.4209/aaqr.2017.12.0602.
25. *Kelman I., Grøntoft T.* Climate change impact on building surfaces and facades // International Journal of Climate Change Strategies and Management. 2011. Vol. 3. Pp. 374—385. DOI: 10.1108/17568691111175669.

26. *Ullauri A., Mejia M. C., Carlos J. G., Michelle S.* Incidence of environmental factors on travertine façade of heritage buildings in the historic center of Cuenca-Ecuador. A test scenario through Digital Imagen Processing // Ge-conservacion. 2024. Vol. 25. Pp. 80—95. DOI: 10.37558/gec.v25i1.1293.
27. *Fassina V.* 46-Influenza dell'inquinamento atmosferico sui processi di degrado dei materiali lapidei // In Bollettino d'Arte "Materiali Lapidei-Problemi Relativi Allo Studio Del Degrado e Conservazione". 1987. Pp. 19—47.
28. *Fassina V., Favaro M., Crivellari F., Naccari A.* The stone decay of monuments in relation to atmospheric environment // Ann. Di Chim. 2001. Vol. 91. Pp. 767—774.
29. *Vyshkvarkova E., Sukhonos O.* Climate change impact on the cultural heritage sites in the European part of Russia over the past 60 years // Climate. 2023. Vol. 11. P. 50. DOI: 10.3390/cli11030050.
30. *Amoroso G., Fassina V.* Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection // Studies in Conservation. 1984. P. 474. DOI: 10.2307/1506020.
31. *Godts S., Orr S. A., Desarnaud J.* NaCl-related weathering of stone: the importance of kinetics and salt mixtures in environmental risk assessment // Heritage Science. 2021. Vol. 9. Iss. 44. DOI: 10.1186/s40494-021-00514-3.
32. 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, J.-D. Gu // International Biodeterioration & Biodegradation. 2016. Vol. 115. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.08.021.
33. Water repellent and biocide treatments: assessment of the potential combinations / C. Moreau, V. Verges-Belmin, L. Leroux, G. Orial, G. Fronteau, V. Barbin // Journal of Cultural Heritage. 2008. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 394—400.
34. *Kim M., Chang T. S., Rhee C. W., Jin J. H.* Feasibility assessment of a microtrac tri-laser diffraction particle size analyzer for use in sedimentary geology: a comparison of grain-size analysis with sieve-pipette method // Journal of the Geological Society of Korea. 2010. Vol. 46. Pp. 197—205.
35. Contribution of road vehicle tyre wear to microplastics and ambient air pollution. sustainability / B. Giechaskiel, T. Grigoratos, M. Mathissen et al. // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 2. Pp. 1—31.
36. *Bielaczyc P. A., Szczotka A., Woodburn J.* Exhaust emissions of particulate matter from light-duty vehicles — an overview and the current situation // Combustion Engines. 2017. Vol. 171. Pp. 227—238.
37. *Аниканова Т. В., Рахимбаев Ш. М., Кафтаева М. В.* К вопросу о механизме углекислотной коррозии строительных материалов // Фундаментальные исследования. 2015. № 5-1. С. 19—26
38. *Kucera V., Fitz S.* Direct and indirect effects of air pollution on materials, including cultural monuments // Water, air, soil, pollution. 1995. Vol. 85. Pp. 153—165. DOI: 10.1007/BF00483697.
39. Effects of air pollution on materials and cultural heritage / J. Tidblad, V. Kucera, M. Ferm et al. // ICP materials celebrates 25 years of research. 2012. Pp. 1—16. DOI: 10.1155/2012/496321.
40. *Perez-Monserrat E. M., Varas-Muriel M. J., De Buergo A. M., Fort R.* Black layers of decay and color patterns on heritage limestone as markers of environmental change // Geosciences. 2016. Vol. 6. DOI: 10.3390/geosciences6010004.
41. Silanes for building protection: a case study in systems thinking approach to materials science education / R. Ciriminna, Y. Albo, A. Fidalgo, L. Ilharco, M. Pagliaro // Education Sciences. 2020. Vol. 10. DOI: 10.3390/educsci10070171.
42. *Nord A. G.* Efflorescence salts on weathered building stone in Sweden // Geol. Föreningen I Stockh. Förhandlingar 1992. Vol. 114. Pp. 423—429.

© Черепанов В. Ю., Лупиногин В. В., 2025

Поступила в редакцию
08.10.2025

Ссылка для цитирования:

Черепанов В. Ю., Лупиногин В. В. Воздействие загрязнения атмосферного воздуха на фасады зданий — объектов культурного наследия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 4(101). С. 228—241. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_228.

Об авторах:

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

Vadim Yu. Cherepanov, Vladislav V. Lupinogin

Volgograd State Technical University

THE IMPACT OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION ON THE FACADES OF BUILDINGS — CULTURAL HERITAGE SITES

The growth of industrial production and active urbanization leads to an increase in the amount of pollutants entering the atmospheric air. Solid particles (dust) are capable of having a direct or indirect impact on the condition of cultural heritage sites. When exposed directly, mechanical abrasion of the surface occurs, as well as corrosion processes caused by the formation of acids from salts. Indirect effects are characterized by changes in climatic conditions, which are determined by three types of interaction “aerosol — radiation”: scattering, absorption of incoming and outgoing radiation.

К e y w o r d s: cultural heritage site, atmospheric air, dust particles, adhesion, PM₁₀, PM_{2.5}, salts, acids, particle deposition, particle distribution modes.

For citation:

Cherepanov V. Yu., Lupinogin V. V. [The impact of atmospheric air pollution on the facades of buildings — cultural heritage sites]. *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. 4, pp. 228—241. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_228.

About authors:

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

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