

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



**КУЗЬМИЧЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКОГО АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И ПАРАМЕТРОВ  
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Азаров Валерий Николаевич

Волгоград – 2019 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Характеристика внешнего вида зданий, сооружений и факторов, влияющих на его ухудшение.....	15
1.2 Анализ состояния воздушной городской среды.....	19
1.3 Оценка воздействия газов на внешний облик зданий, сооружений и памятников архитектуры.....	23
1.4 Анализ влияния процесса адгезии пыли на загрязнение зданий и сооружений.....	29
1.5 Загрязнение зданий и сооружений как элемент визуальной экологии.....	34
1.6 Существующие проектные решения и нормативы по внешнему виду зданий и сооружений.....	36
1.7 Обоснование и выбор направления исследования.....	41
1.8 Выводы по главе 1.....	42
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	44
2.1 Теоретические основы процесса адгезии ААГС на вертикальных поверхностях зданий и сооружений.....	44
2.2 Исследование ААГС как составной части адгезионного процесса....	48
2.2.1 Основные свойства ААГС .....	48

2.2.2	Методика определения дисперсного состава пыли.....	50
2.2.3	Результаты исследования химического состава пыли.....	58
2.3	Анализ свойств вертикальных поверхностей.....	70
2.4	Исследование климатических факторов.....	77
2.5	Режим ветра и особенности атмосферной циркуляции.....	81
2.6	Исследование распределения повторяемости скоростей ветра.....	83
2.7	Выводы по главе 2.....	85
ГЛАВА 3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	86
3.1	Описание экспериментальной установки .....	86
3.2	Анализ исследуемых образцов ААГС.....	89
3.3	Методика проведения экспериментальных исследований налипания ААГС на вертикальные поверхности.....	91
3.4	Анализ результатов экспериментальных исследований налипания ААГС на различные вертикальные поверхности.....	94
3.5	Методика проведения экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей.....	97
3.6	Анализ результатов экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей....	100
3.7	Анализ процессов адгезии (налипания и отрыва) ААГС на вертикальных поверхностях.....	102
3.8	Выводы по главе 3.....	104
ГЛАВА 4	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	106

4.1	Теоретические расчёты суммарного налипания ААГС на различные вертикальные поверхности.....	106
4.1.1	Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на стеклянную поверхность .....	107
4.1.2	Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на оштукатуренную и окрашенную поверхности.....	111
4.1.3	Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на металлическую поверхность.....	112
4.2	Теоретические расчёты изменения величины слоя пыли, вызванного отрывом её частиц с различных вертикальных поверхностей.....	113
4.2.1	Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на оштукатуренной и окрашенной поверхностях.....	114
4.2.2	Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на стеклянной поверхности.....	115
4.2.3	Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на металлической поверхности.....	117
4.3	Натурные исследования загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений ААГС .....	119
4.4	Выводы по главе 4.....	126
ГЛАВА 5	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	128
5.1	Опыт использования теоретических и экспериментальных исследований загрязнения зданий и сооружений.....	128
5.1.1	Апробация результатов теоретических и экспериментальных исследований налипания атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий.....	131

5.1.2	Апробация результатов теоретических и экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей зданий.....	134
5.2	Методики расчёта загрязнения зданий и сооружений.....	137
5.3	Программа для расчёта загрязнения зданий и сооружений.....	140
5.4	Опыт внедрения теоретических и экспериментальных исследований загрязнения зданий и сооружений .....	142
5.5	Оценка степени загрязнения зданий и сооружений .....	142
5.6	Закономерности загрязнения зданий и сооружений в зависимости от их местоположения.....	147
5.7	Выводы по главе 5.....	149
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	150
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	167
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Сопроводительная документация.....	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б Режим ветра в г. Волгограде за период 2015–2018 гг.....	172
	ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты натурных исследований загрязнения зданий в г. Волгограде за 2018 г. ....	174
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г Данные теоретических расчётов налипания атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий и сооружений за 2018 г.....	177
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д Теоретический расчёт суммарного отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей зданий и сооружений.....	179

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в связи с повышенной антропогенной нагрузкой на воздушную городскую среду здания, сооружения и памятники архитектуры нуждаются в защите. В соответствии с Государственным докладом «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году», «под негативным воздействием экологических факторов в 2009 году в России находилось более 35,1 тыс. памятников истории и культуры, в том числе под воздействием факторов естественного происхождения – около 9,7 тыс., под воздействие факторов антропогенного происхождения – около 25,4 тыс. объектов» [40]. Эти данные свидетельствуют о сохранении высокого уровня подверженности памятников негативному воздействию экологических факторов и увеличиваются с каждым годом преимущественно за счет антропогенных процессов. Одним из основных экологических факторов, который негативно воздействует на объекты культурного наследия, является содержащаяся в воздухе пыль. Ее образование связано как с естественными процессами, такими как выветривание, разрушения горных пород, вулканическая активность, космическая пыль, так и с антропогенными процессами, связанными с развитием промышленности, сельского и коммунально-бытового хозяйства, транспортной активностью [11,19,67–69,107,108]. В связи с этим актуальными являются исследования закономерностей загрязнения зданий, являющиеся следствием процесса адгезии (налипания и отрыва) частиц городской пыли на вертикальных поверхностях сооружений, которые демонстрируют архитектурные и конструктивные особенности различных исторических периодов развития страны.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.23.19 «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства», пункты 1,3,4,8.

**Объект исследования** – вертикальные поверхности зданий и сооружений, расположенных в городской среде.

**Предмет исследования** – степень загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами адгезии частиц пыли и порошков занимались отечественные и зарубежные ученые. В монографии Дерягина Б.В., Кротовой Н.А., Смильги В.П. [45] изложена теория взаимодействия твердых тел и рассмотрена связь адгезии с трением. В трудах Фукса Н.А. затронуты некоторые вопросы «прилипания» частиц в воздушном потоке. Опубликован ряд экспериментальных и теоретических работ по адгезии частиц в жидкой среде (Дерягин Б.В., Фукс Г.И., Бузаг А.). Авторство большинства работ, посвященных вопросам адгезии пыли и порошков, принадлежит Зимону А.Д.

Учёт экологических факторов при градостроительном проектировании, исследования фактора запыленности в формировании и реконструкции городской застройки, вопросы концепции биосферной совместимости городов и поселений, вопросы экологии визуальной среды отражены в работах Азарова В.Н., Бакаевой Н.В., Галишниковой В.В., Гордона В.А., Городкова А.В., Донцовой Т.В., Емельянова С.Г., Игнатьева В.А., Ильичева В.А., Колчунова В.И., Птичниковой Г.А., Садовниковой Н.П., Салтановой С.И., Сидоренко В.Ф., Стеценко С.Е., Теличенко В.И., Федосовой С.И., Филина В.А., Шеиной С.Г. и многих других авторов.

Исследование свойств пылевого аэрозоля, изучение пыли в виде дисперсной системы, поведение частиц пыли в условиях действия на них внешних факторов, изучение вопросов, связанных со снижением концентрации пыли в воздушной среде, отражено в работах Азарова В.Н., Амерханова Р.А., Батманова В.П., Беспалова В.И., Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Гращенкова Н.Ф., Грина Х., Диденко В.Г., Дьякова В.В., Желтобрюхова В.Ф., Жуковой Н.С., Журавлева В.К., Журавлева В.П.,

Кирина Б.Ф., Коузова П.А., Кошкарева С.А., Лобойко В.Ф., Логачева И.Н., Логачева К.И., Ложкиной О.В., Луговского С.И., Манохина В.Я., Медникова Е.П., Мензелинцевой Н.В., Минко В.А., Никитина В.С., Перцева Н.В., Позднякова Г.А., Ребиндера П.А., Сергиной Н.М., Сидельниковой О.П., Сидоренко В.Ф., Сидякина П.А., Фукса Г.И., Фукса Н.А., Шеиной С.Г. и многих других авторов.

Однако, вопросы, связанные с исследованием закономерностей загрязнения зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, являются недостаточно изученными.

**Научная гипотеза** состоит в существовании диапазона направления воздушного потока к вертикальной поверхности зданий и сооружений, при котором происходит налипание частиц атмосферного аэрозоля, и диапазонов, при которых осуществляется отрыв данных частиц.

**Цель работы** – исследование закономерностей загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений городской среды пылью, содержащейся в атмосферном воздухе.

На основании поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Анализ литературных источников для выявления степени научной разработанности темы исследования, посвященной изучению загрязнений зданий и сооружений, расположенных в городской среде.
2. Теоретические и экспериментальные исследования процесса адгезии (налипания и отрыва) частиц городской пыли на оштукатуренной, окрашенной, стеклянной и металлической вертикальных поверхностях.
3. Анализ основных свойств пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, климатических факторов и других условий протекания процесса адгезии (налипания и отрыва) городской пыли на различных вертикальных поверхностях зданий и сооружений.



4. Натурные исследования загрязнения пылью наиболее характерных для городской среды вертикальных поверхностей.

5. Экспериментальные исследования возможности существования диапазонов направлений воздушного потока к вертикальной поверхности зданий и сооружений, при которых происходит налипание частиц городского атмосферного аэрозоля, и диапазонов, при которых осуществляется отрыв данных частиц.

6. Разработка методик и программы для расчёта текущего загрязнения и прогнозирования загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений в будущем, а также оценки степени ухудшения их внешнего облика.

7. Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Научная новизна** заключается в результатах исследования закономерностей процесса адгезии (налипания и отрыва) атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальных поверхностях зданий и сооружений и определяется следующими результатами:

1. Экспериментально доказано существование диапазона направления воздушного потока к вертикальной поверхности зданий и сооружений, при котором происходит налипание частиц городского атмосферного аэрозоля, и диапазонов, при которых осуществляется отрыв данных частиц.

2. Предложена расчётная модель для определения средней силы адгезии для атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) с учётом подчинения дисперсного состава ААГС усечённому логарифмически–нормальному закону распределения.

3. Показано, что пыль, осевшая на исследуемых вертикальных поверхностях зданий и сооружений, подчиняется усечённому логарифмически–нормальному закону распределения.

4. На основании экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости для налипания пыли на наиболее характерные для городской среды вертикальные поверхности (стеклянная, металлическая, оштукатуренная,

окрашенная поверхности) от таких факторов, как концентрация пыли в воздушном потоке, максимальный размер частиц, скорость воздушного потока, направление воздушного потока к вертикальной поверхности.

5. На основании экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости для отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей от таких факторов, как величина ранее налипшего пыли на вертикальные поверхности ( $\text{мг/м}^2$ ), скорость воздушного потока, направление воздушного потока к вертикальной поверхности.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Экспериментально установлено и затем подтверждено натурными исследованиями, что при всех значениях остальных исследуемых факторов при горизонтальных воздушных потоках к вертикальной поверхности под углами, находящимися в диапазоне  $30^\circ \div 150^\circ$ , происходит налипание пыли, а при горизонтальных воздушных потоках к вертикальной поверхности под углами, находящимися в диапазоне  $0^\circ \div 20^\circ$  и  $160^\circ \div 180^\circ$ , происходит отрыв частиц пыли.

2. Разработана экспериментальная установка для запыления вертикальной пластины, позволяющая в лабораторных условиях при различных режимах воздушного потока исследовать закономерности процесса адгезии (налипания и отрыва) частиц пыли на вертикальных поверхностях, выполненных из разнообразных строительных и отделочных материалов.

3. Получены регрессионные зависимости для налипания городского атмосферного аэрозоля, а также регрессионные зависимости для отрыва частиц городской пыли на различных вертикальных поверхностях, наиболее характерных для городской среды, от исследуемых случайных факторов.

4. Установлено, что при исследовании процесса адгезии (налипания и отрыва) пыли на различных вертикальных поверхностях в условиях г. Волгограда наиболее

значимыми из числа исследуемых факторов являются скорость и направление воздушного потока.

5. Получены расчетные формулы для прогнозирования годового, сезонного и др. загрязнения пылью различных вертикальных поверхностей, наиболее характерных для городской среды с использованием распределения таких климатических факторов, как скорость и направление воздушного потока.

6. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны **методики и программа** для расчета текущего и прогнозирования будущего загрязнений вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в городской среде, а также произведена оценка степени загрязнения их фасадов.

**Методология и методы исследования** заключались в аналитическом обобщении известных научных и технических результатов, натурных, теоретических и лабораторных исследований с использованием такого оборудования, как экспериментальная установка для запыления вертикальной пластины с целью исследования адгезии (налипания и отрыва) атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на различных вертикальных поверхностях, стереоскопический микроскоп МБС-10 совместно с программой «Dust-1» для определения дисперсного состава ААГС, сканирующий электронный микроскоп Versa 3D для изучения химического (элементного) состава пыли. План экспериментальных исследований представляет собой матрицу планирования, которая соответствует центральному композиционному рототабельному плану (ЦКРП). Она имеет в основе план полного факторного эксперимента и дополняется определенными точками факторного пространства, а именно звездными точками и опытами в центре плана. Обработка данных, полученных в результате эксперимента, была проведена при помощи пакета программ статистического анализа «STATISTICA». Значимость коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента, адекватность математической

модели – по критерию Фишера, воспроизводимость результатов проводилась при помощи критерия Кохрена. Математическая обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической статистики и математического анализа.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Положение о справедливости регрессионных зависимостей для расчёта величин налипания и отрыва частиц городской пыли на различных вертикальных поверхностях.

2. Положение о справедливости выделения в диапазонах направлений воздушного потока к вертикальной поверхности двух принципиально различных участков: при горизонтальных воздушных потоках к вертикальной поверхности под углами, находящимися в диапазоне  $30^\circ \div 150^\circ$ , происходит налипание пыли, а при горизонтальных воздушных потоках к вертикальной поверхности под углами, находящимися в диапазонах  $0^\circ \div 20^\circ$  и  $160^\circ \div 180^\circ$ , происходит отрыв частиц пыли.

3. Положение о справедливости расчётных формул для определения величины загрязнения зданий и сооружений, учитывающей процессы налипания и отрыва частиц городской пыли на вертикальных поверхностях, методом последовательного перебора отрезков времени с постоянным направлением ветра.

4. Положение о возможности использования приближённого расчёта величины загрязнения зданий и сооружений, учитывающей процессы налипания и отрыва частиц городской пыли на вертикальных поверхностях, для прогнозирования ухудшения их внешнего вида на основании распределения таких климатических факторов, как скорость и направление воздушного потока.

**Личный вклад** соискателя заключается в том, что все положения, выносимые на защиту, получены автором лично, в том числе анализ и обобщение научно-технической и нормативной литературы, разработка методик расчётного определения текущего загрязнения, а также прогнозирования загрязнения зданий и сооружений в будущем, осуществление теоретических и экспериментальных

исследований адгезии (налипания и отрыва) частиц пыли на таких наиболее характерных для городов вертикальных поверхностях, как оштукатуренная, окрашенная, стеклянная, металлическая поверхности.

**Степень достоверности** научных положений данной работы соответствует современным требованиям. Она обоснована использованием классических положений теоретического анализа, сопоставлением результатов экспериментальных исследований в лабораторных, а также натурных условиях с результатами теоретических обобщений и данными исследований, проведенных ранее.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались, а также получили одобрение на 2-й Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016 г.), 7-й Международной конференции «Information, Intelligence, Systems & Applications» (Греция, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2017 г.), Международной конференции «Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering II» (Южная Корея, 2017 г.), I Международной научно-технической конференции «Инженерные системы и энергоэффективность в строительстве, природообустройстве» (Крым, 2018 г.), научно-практическом семинаре «Современные проблемы техносферной безопасности (Опасности вокруг нас)» (Волгоград, 2018 г.).

**Реализация результатов работы.** Предложенная методика расчёта текущего и прогнозирования будущего загрязнения зданий и сооружений, а также периодичности очистки их вертикальных поверхностей апробирована в следующих организациях: ООО «НПО Волгоградохранкультура» при разработке разделов научно–проектной документации на проведение работ по сохранению объектов культурного наследия; ООО «Управление Фасадремонт Волгоградгоргражданстрой»

при выполнении работ по капитальному ремонту фасадов жилых домов г. Волгограда; ООО «Чистый мир» при проведении работ по очистке фасадов зданий. Методика, позволяющая прогнозировать запыление воздушной городской среды, внедрена в ООО «Экотехмониторинг» при выполнении разделов проектов ОВОС и ПДВ.

**Публикации.** Основные результаты по теме настоящего исследования опубликованы в 15 работах. Из них 8 статей, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Перечнем ВАК РФ, в том числе 1 статья в Сборнике научных трудов к Общему собранию членов РААСН в 2019 году, 4 статьи, опубликованных в журналах, цитируемых в международных базах данных, в том числе в базе данных Scopus – 3 статьи, в базе данных Web of Science – 3 статьи, в базе данных Chemical Abstracts Service – 1 статья, оформлена заявка на патент РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 185 страницах, из них 166 страниц основного текста. Содержит 63 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 111 источников и 5 приложений.

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Азарову Валерию Николаевичу, под руководством которого выполнялась данная работа.

## **ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1 Характеристика внешнего вида зданий, сооружений и факторов, влияющих на его ухудшение**

Сохранность исторических зданий и сооружений является важной задачей, требующей комплексного подхода при ее реализации, так как данные объекты демонстрируют разнообразные декоративные и конструктивные элементы, присущие различным временным периодам. Это подчеркивает тесную связь с историей и культурой страны. Во время эксплуатации зданий могут возникать повреждения, ведущие за собой разрушение как отдельного элемента, так и всей конструкции в целом. Разрушение – макроскопическое нарушение сплошности материала, возникающее из-за различных воздействий на него, часто протекает одновременно с пластической или упругой деформацией. Повреждения – это начальная стадия разрушения отдельных элементов сооружения, связанное с потерей первоначальных свойств строительной конструкции или ее отдельных элементов. Факторы, вызывающие повреждение, а впоследствии и разрушение зданий и сооружений можно классифицировать на следующие группы (рисунок 1.1) [27,60,93]:

1. Внешние воздействия (природные и искусственные). Внешние воздействия природного происхождения подразделяют на атмосферные, климатические, сейсмические, биологические и т.п. К искусственным внешним воздействиям относят вибрации, удары, взрывы, блуждающие токи [27,60,93].

2. Внутренние факторы (обусловленные технологическими процессами). К ним относят выделение парогазовых, водных и масляных эмульсий, водные и масляные

технологические загрязнения, механические воздействия – удары, вибрации, нагрузки [27,60,93].

3. Дефекты, возникающие по причине допущенных ошибок во время изысканий, проектирования, строительства объекта. К дефектам первой группы относят потерю прочности и устойчивости. К дефектам второй группы относят повреждение ограждающих конструкций и второстепенных элементов сооружения [27,60,93].

4. Нарушение правил эксплуатации здания и оборудования. К ним относится нарушение правил использования сооружения и его несвоевременный ремонт [27,60,93].



Рисунок 1.1 – Факторы, воздействующие на здания



В зависимости от характера процессов, приводящих к ухудшению внешнего облика, а в дальнейшем – к разрушению зданий, воздействия на строительные конструкции подразделяют на следующие группы: физико-химические воздействия (коррозия и окисление, вызванные растворами кислот, щелочей, солей, грунтовой влаги, воздействие электрического тока, биологических процессов и др.) и механические воздействия (приложение сверхрасчётной нагрузки, деформации грунтов оснований, сейсмическое воздействие, механическое повреждение). В основном, здания и их конструктивные элементы преждевременно выходят из строя от суммарного воздействия рассмотренных факторов. По степени разрушения выделяют следующие категории повреждений [24,27,60,93]:

1. Повреждения аварийного характера, вызванные дефектами, допущенными при изысканиях, проектировании, строительстве, стихийными явлениями – ливнями, снегопадами, затоплением, нарушениями правил эксплуатации зданий. Данный вид повреждений устраняется заменой конструкции [24,27,60,93].

2. Разрушения несущих конструкций, вызванные внешними и внутренними факторами, нарушением правил эксплуатации. Такие повреждения не являются аварийными и устраняются при капитальном ремонте усилением или заменой несущих конструкций [24,27,60,93].

3. Разрушения второстепенных элементов (ухудшение внешнего облика строительных конструкций), устраняемые при текущем ремонте [24,27,60,93].

При эксплуатации зданий и сооружений различают силовое воздействие нагрузок, вызывающее объемно-напряженное состояние, и агрессивное воздействие окружающей среды, в результате чего строительные конструкции изнашиваются и выходят из строя [24,27,60,93]. Агрессивной средой называется среда, под влиянием которой изменяются свойства и структура строительных материалов. Это приводит к снижению прочности и разрушению структуры материалов. Такое разрушение называется коррозией. Агрессивные среды подразделяют на твердые, жидкие и

газообразные [27]. К твердым агрессивным средам относят сыпучие или кусковые технические продукты, пыль, грунты и т.п. Их агрессивность оценивается следующими показателями: дисперсностью, гигроскопичностью, растворимостью в воде и влажностью окружающей среды. Влага в твердых средах играет особенно активную роль [27]. К жидким агрессивным средам относят растворы солей, кислот, щелочей, а также нефть, масла, растворители и др. Агрессивность таких сред определяется следующими показателями: концентрацией агрессивных агентов, температурой, скоростью движения и др. Коррозионные процессы более интенсивно протекают в жидкой агрессивной среде [27]. Газообразные агрессивные среды состоят из смеси воздуха, газов, водяных паров и паров других летучих веществ. К ним относят такие соединения, как кислород ( $O$ ), водяной пар ( $H_2O$ ), двуокись углерода ( $CO_2$ ), диоксид серы ( $SO_2$ ), оксид азота ( $NO_2$ ), озон ( $O_3$ ), сероуглерод ( $CS_2$ ) и др. Их агрессивность определяют следующие основные показатели: вид и концентрация газов, растворимость газов в воде, влажность и температура [27].

Влияние воздушной среды на внешний облик зданий и сооружений является одним из наиболее агрессивных факторов, приводящих к ухудшению состояния фасадов строительных конструкций, а также способствующих их дальнейшему разрушению по причине содержания пыли и газов. Загрязненный атмосферный воздух, преимущественно в сочетании с влагой, вызывает преждевременное загрязнение, износ, коррозию, растрескивание и разрушение конструкций. Атмосферные осадки, выпадающие вблизи зданий, стекающие с крыш, образуемые от притока с окружающей территории при уклоне местности в сторону сооружения, способствуют образованию поверхностных вод, которые производят увлажняющее действие в результате их просачивания в грунт вблизи фундаментов. Одновременно с тем они воздействуют на цокольную часть здания, вызывая его разрушение [100].

## 1.2 Анализ состояния воздушной городской среды

Атмосферный воздух представляет собой сложную, динамически развивающуюся систему, которая состоит из разнообразных газов и мельчайших твердых и жидких частиц, находящихся во взвешенном состоянии – аэрозолей (дым, пыль, туман, бактерии, вирусы, пыльца, споры) [5]. Пыль, содержащаяся в атмосферном воздухе городской среды, является одним из главных аспектов ухудшения его качества. Пыль представляет собой твердые взвешенные частицы, которые находятся в воздушной среде под влиянием воздушных течений и оседают на разнообразных поверхностях вместе с осадками или под воздействием силы земного притяжения. В данной работе для обозначения пыли, содержащейся в атмосферном воздухе города и оседающей на вертикальных поверхностях зданий и сооружений, используется термин атмосферный аэрозоль городской среды (ААГС). Происхождение пыли связано с природными и антропогенными процессами [19]:

### 1. Природные источники загрязнения атмосферы [19]:

- Ветровая эрозия. На земной поверхности ежегодно из атмосферы осаждается 4,6-8,3 млрд. т терригенной пыли. Основными районами образования этого вида пыли являются территории с небольшим количеством атмосферных осадков и высокой величиной солнечной радиации – степи и пустыни. В зависимости от мощности образования твердых частиц выделяют локальные и глобальные источники: к локальным источникам относят пустыни Средней Азии, Монголии, Китая, к глобальным – пустыни: Сахара, Гоби [19].

- Вулканическая активность. Вклад вулканической активности в атмосферный аэрозоль оценивается величиной порядка 40 млн. т в год, что составляет около 0,5% от массы почвенного аэрозоля. Крупные вулканические извержения сопровождаются

образованием газопепловых облаков, в состав которых входят такие вещества, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{NCl}$ ,  $\text{HF}$  и др. [19].

- Космическая пыль. Происхождение этого вида пыли доподлинно не известно. По содержанию химических элементов частички подразделяются на «каменные» и «железные». В «каменных» преобладают такие вещества, как  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Cr}$ , в «железных» –  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ . Возрастание количества космической пыли нарушает тепловой баланс атмосферы, что влияет на климат [19].

- Моря и океаны. Испарение влаги с поверхности данных водоемов обогащает воздух кристаллами морских солей. Они представлены, в основном, хлористым натрием, хлористым магнием, хлористым кальцием, бромистым калием. Наибольшее количество солей поступает в атмосферу при больших волнах и штормах [19].

- Пожары. Пожары влияют на газовый состав атмосферы. Наземная часть биомассы, которая обычно частично сгорает при пожарах, составляет 70-80% [19].

- Пыльца растений. В разгар цветения от одного растения в воздух поступает несколько миллионов гранул пыльцы в день. Растительная пыльца является причиной ряда аллергических заболеваний дыхательных путей [19].

2. Антропогенные источники загрязнения атмосферы. Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха представлено первичными и вторичными примесями. Вторичные примеси образуются в результате химических реакций между несколькими соединениями или между примесью и природным газом. К числу таких примесей относятся альдегиды. Основными антропогенными являются следующие источники загрязнения атмосферы [19]:

- Теплоэнергетика. В России теплоэнергетика является основным источником загрязнения атмосферного воздуха. В процессе переработки и сжигания топлива происходит образование твердых частиц, углекислого газа, окислов серы и азота, окислов металлов. Наиболее токсичными веществами являются оксид ванадия и бенз(а)пирен [19].

- Черная металлургия. Металлургические предприятия выделяют в атмосферу большое количество частиц пыли, сернистого ангидрида, окиси углерода, а также фенол, сероводород, аммиак, нафталин, бензол, циклические углеводороды и другие химические вещества [19].

- Химическая промышленность. Для химической и нефтехимической промышленности в связи с многопрофильностью предприятий характерно большое разнообразие качественного и количественного состава выбрасываемых веществ [19].

- Транспорт. Среди железнодорожного транспорта основное количество загрязняющих веществ выделяют тепловозы. Трубопроводный транспорт более эффективен, т.к. менее загрязняет окружающую среду. Однако, при транспортировке нефти по нефтепроводам часть ее приходится сжигать для разжижения нефти. При этом процессе большое количество вредных веществ попадает в атмосферу [19]. Основным видом транспорта, загрязняющим окружающую среду, является автомобильный. Источниками загрязнения являются отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания, картерные газы (для автомобилей с карбюраторным двигателем), испарение топлива из топливной системы и др. Определяющая доля выбросов вредных веществ принадлежит грузовым автомобилям. Структура выбросов автомобильного транспорта представлена следующими веществами: оксиды углерода и азота, углеводороды, бенз(а)пирен, свинец, тяжелые металлы, пыль и др. Пылевые частицы образуются при истирании покрышек, выделяются с отработанными газами, завозятся в город в виде грязи на поверхности кузова автомобилей [19].

По своему происхождению пылевые частицы подразделяют на органические (растительная пыль – древесная, хлопковая, льняная и др. и животная – шерстяная), неорганические (металлическая пыль – алюминиевая, стальная, медная и др. и минеральная – асбестовая, кварцевая и др.) и смешанные. По способу образования и

дисперсности различают аэрозоли конденсации и аэрозоли дезинтеграции. Аэрозоли конденсации по своим размерам гораздо меньше аэрозолей дезинтеграции (менее 1 мкм) и состоят из частиц правильной шарообразной или кристаллической формы. Они образуются по причине сгущения высоконагретых паров при их охлаждении. Аэрозоли дезинтеграции образуются при дроблении какого-либо твердого вещества, данные частицы имеют неправильную форму, их размер зависит от вещества, из которого они получены и интенсивности его размельчения [41].

Наиболее важные физико–химические свойства пылевых частиц обуславливаются их массой, формой, дисперсностью, способностью к растворению и химическим составом. Для гигиенической оценки пыли наиболее важным признаком является ее дисперсность. С размерами пылевых частиц связаны длительность пребывания их во взвешенном состоянии в воздухе, глубина проникновения в дыхательные пути, физико-химическая активность и другие свойства. Пылевые частицы размером 200 мкм и более, подчиняясь закону тяготения, не испытывают большого сопротивления воздуха и быстро оседают с возрастающим ускорением. Пылевые частицы размером менее 200 мкм, испытывая сопротивление воздуха, оседают с постоянной незначительной скоростью. Частицы пыли менее 0,1 мкм практически не оседают и находятся в постоянном хаотичном движении в воздухе. Таким образом, чем меньше размер пылевых частиц, тем дольше они задерживаются во взвешенном состоянии, следовательно, тем больше вероятность их попадания в дыхательные пути [30]. Химическая активность частиц пыли возрастает с увеличением ее дисперсности (увеличением удельной поверхности размельчаемых веществ). Важное значение имеет растворимость пыли. Если пыль не токсична и ее воздействие приводит только к механическому раздражению, то хорошая растворимость данных пылевых частиц пыли является благоприятным фактором. В случае токсичной пыли хорошая растворимость является отрицательным фактором [30].

По своему воздействию на здоровье жителей промышленных городов [83,104] мелкодисперсные частицы пыли подразделяют на следующие размерные фракции (англ. – Particulate Matter):  $PM_{10}$  используют для обозначения частиц с диаметром не более 10 мкм,  $PM_{2.5}$  – для частиц с диаметром не более 2,5 мкм. [97,98]. При вдыхании мелкодисперсные частицы  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  попадают в верхние дыхательные пути и лёгкие. В результате длительного воздействия данных частиц развиваются хронические воспалительные процессы дыхательных путей – бронхиты, фарингиты, трахеиты, а также воспаление лёгких. Длительное увеличение допустимой концентрации частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  в атмосферном воздухе городов грозит возникновению у жителей заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной систем, а в особо тяжелых случаях приводит к летальному исходу [83,104]. В роли критерия качества атмосферного воздуха в России используют следующие санитарно-гигиенические нормы: предельно-допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в воздухе. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17 задают ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест для взвешенных веществ (недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных мест), взвешенных частиц размером не более 10 мкм ( $PM_{10}$ ) и для частиц размером не более 2,5 мкм ( $PM_{2.5}$ ) [33].

### **1.3 Оценка воздействия газов на внешний облик зданий, сооружений и памятников архитектуры**

Результаты пагубного воздействия газов, содержащихся в атмосферном воздухе городской среды, на строительные материалы, известны давно. Коррозионное

воздействие диоксида серы на металлические конструкции было продемонстрировано на примере лабораторных экспериментов английским физиком–экспериментатором Чарльзом Верноном в 1930-х годах, а позднее подтверждено группой ученых Schikorr, Hudson, Stanners в результате натурных испытаний в последующие десятилетия. Как только скандинавские ученые обратили внимание на феномен кислотного осаждения в 1960-х годах, сразу же появилось множество доказательств его негативного воздействия на внешний облик зданий и сооружений. После принятия Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния в рамках Европейской Экономической комиссии ООН в 1979 г. был запущен ряд Международных совместных программ для оценки последствий загрязнения важных частей экосистемы. Так как изучение ухудшения внешнего облика и разрушения строительных материалов, из которых созданы исторические здания, сооружения и памятники архитектуры, считалось приоритетным направлением исследования, в 1985 г. была запущена одна из Международных совместных программ с целью ликвидации пробелов в данной области знаний [106].

Газообразные агрессивные среды состоят из смеси воздуха, газов, водяных паров и паров других летучих веществ. Наличие агрессивных по отношению к строительным конструкциям газовыделений характерно для многих отраслей промышленности – черной и цветной металлургии, топливной, химической и нефтехимической промышленности и других производств [106]. Их агрессивность определяют следующие основные показатели: концентрация газов, растворимость газов в воде, влажность, температура воздуха и др.. К наиболее агрессивным газам относятся сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ ), фтористый водород ( $\text{HF}$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), оксид азота ( $\text{NO}$ ), хлористый водород ( $\text{HCl}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), хлор ( $\text{Cl}_2$ ) и другие вещества. По степени агрессивного воздействия на строительные конструкции их условно подразделяют на четыре группы: А, В, С, D. Степень агрессивности данных газов возрастает от А к D [84–86]. За исключением аммиака и кислорода, все газы



кислотообразующие. Образование из них кислот происходит только при наличии в воздухе или на поверхности строительных конструкций влаги (конденсат или туман). По этой причине усиливающим фактором коррозионных процессов, возникающих в поверхностных слоях строительных объектов, является повышенная влажность воздуха. В зависимости от порога увлажнения различают три степени влагонасыщения: зона сухих газов при влажности воздуха до 60% (агрессивность весьма слабая), порог увлажнения при влажности воздуха 60 – 75%, зона влажных газов при влажности выше 75% (агрессивность быстро возрастает с увеличением влажности и зависит от природы газов). Скорость протекания коррозионных процессов строительных объектов прямо пропорциональна интенсивности воздействия газовых сред. Местное увлажнение характерно при действии паров хлористого водорода на бетон или штукатурку. Образующийся при этом на поверхности гигроскопический хлористый кальций поглощает влагу из воздуха. Действие газа на пористые строительные материалы (бетон, кирпич, древесина) отмечается не только на поверхности. Например, в бетон невысокой плотности за год газ может проникать на глубину до 10 см, а в плотный бетон – до 2 см [43,44].

*Диоксид серы.* Химическая деградация природного известкового строительного камня в загрязненных городских условиях обусловлена превращением кальцита в гипс. Реакцию сульфирования в упрощенной форме можно представить следующим образом [43,44]:



Начальные и конечные продукты реакции хорошо известны, однако недостаточно известно о промежуточных стадиях. В 1988 г. Учёным V. Fassina было предложено три возможных варианта в зависимости от различных атмосферных условий. Вероятно, наиболее важным процессом является гетерогенное окисление  $SO_2$  в водной фазе, которое происходит в атмосфере или на поверхности камня. По другому мнению, преобладающий механизм связан с растворением  $SO_2$  во влаге,

присутствующей в камне в виде конденсации в капиллярах или поглощенной гигроскопическими солями. Катализаторами данной реакции являются сажа и пыль в виде примесей переходных металлов, таких как соединения железа и марганца. Установлено, что сухое осаждение  $\text{SO}_2$  является доминирующим механизмом воздействия в городской среде. Количество аэрозольной серы, которая осаждается на вертикальных каменных поверхностях фасадов зданий и сооружений, мала по сравнению с вкладом газообразной серы. Другие исследования демонстрируют значительное воздействие осаждения  $\text{CaSO}_4$  из атмосферы в крупные скопления гипса на поверхности силикатного песчаника. Данные наблюдения в совокупности с проявлением гипсовых скоплений даже на бронзовых и стеклянных поверхностях подтверждают, что гипс не всегда полностью исходит из подстилающей породы [43,44].

Гораздо более растворимый гипс (2,4 г/л) по сравнению с кальцитом (0,014 г/л) легко смывается с каменных поверхностей, которые непосредственно подвергаются воздействию атмосферных осадков. Химический состав и физические свойства коры отличаются от остальной части камня: более высокая плотность, более низкая проницаемость для жидкости, полное или частичное замещение кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) гипсом ( $\text{CaSO}_4$ ) [43,44]. На каменных материалах, таких как песчаник, гранит, кирпич, сухое осаждение имеет тенденцию к образованию тонкого черного скопления. Как лабораторные, так и натурные исследования показали корреляцию между количеством этого загрязнения и сухого осаждения оксидов серы [Национальная программа оценки кислотных дождей (NAPAP), США, 1992]. Важно различать влияние  $\text{SO}_2$  и кислотных дождей, поскольку двуокись серы поступает из местных источников, в то время как кислотные дожди являются результатом переноса на большие расстояния и химической трансформации  $\text{SO}_2$  из отдаленных источников [43,44].

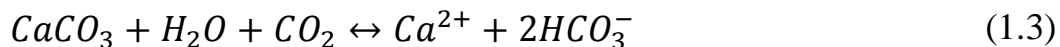
*Оксиды азота.* Оксиды азота вносят значительный вклад в общую картину загрязнения воздуха и образованию кислотных дождей. Однако их продукты реакции, по-видимому, не присутствуют на карбонатном камне в той же степени, что и для  $\text{SO}_2$ . Существование биологических источников нитратов еще более усложняет взаимосвязь между уровнями  $\text{NO}_x$  в атмосфере и появлением нитратов на открытых поверхностях. Трудность в обнаружении кристаллов нитрата кальция на открытых поверхностях камня, вероятно, объясняется его очень высокой растворимостью (2660 г/л для  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) в воде и гигроскопическим характером. Диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) резко увеличивает скорость коррозии известковых камней в  $\text{SO}_2$ -содержащих атмосферах при высокой относительной влажности воздуха. Доказано, что  $\text{NO}_2$  действует как катализатор окисления S(IV) до S(VI) на поверхности кальцита в присутствии молекулярного кислорода во влажных условиях (RH:90%). Установлено, что обогащение нитратов на различных известковых типах камня (мрамор, известняк, песчаник) происходит главным образом от осаждения азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) в газообразном состоянии и в меньшей степени до сухого осаждения  $\text{NO}_2$ . Из-за высокой растворимости нитратные соли транспортируются во внутреннюю часть камня, где они подвергаются фазовым превращениям, таким как кристаллизация и гидратация, в зависимости от условий окружающей среды (температуры и относительной влажности). Данные процессы могут вызвать микротрещины в структуре камня и, следовательно, ускорить его износ [43,44].

*Углекислый газ.* Растворение кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) с поверхности карбонатных камней обычно выражается в виде суммы трех факторов [43,44]:

$$\begin{aligned} \text{Потери камня} = & \text{Осаждение сухой кислоты } (\text{SO}_2, \text{HNO}_3) + \\ & \text{Кислотная дождевая нейтрализация} + \text{Карстовое растворение } (\text{pH} = 5,6) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Первый термин, сухое осаждение  $\text{SO}_2$  и  $\text{HNO}_3$  и последующее растворение сульфатов кальция и нитратов, как обсуждалось выше, в основном обусловлено относительно местными источниками. Второй термин (нейтрализация кислотного

дождя) относится к наличию «свободной» кислотности (т.е.  $H^+$ , независимо от природы аниона) в дождевой воде, сверх естественных кислот в результате человеческой деятельности, и в основном это обусловлено более удаленными источниками. Третий термин (растворение карста) относится к растворению кальцита водой в равновесии с углекислым газом атмосферы ( $pH = 5,6$ ) и определяется общим уравнением [43,44]:



Исследования показали, что данный процесс нельзя игнорировать даже при наличии кислотных дождей. До 85% годовой скорости рельефа поверхности известняка может быть вызвано эффектом чистого воздуха (карст) (5% обусловлено кислотными дождями, и только 10% связано с атакой  $SO_2$ ). Поскольку дождевая вода, протекающая над карбонатным строительным камнем, никогда не находится в равновесии с фазой кальцита (недонасыщена карбонатом), это преувеличивает эффект карстового процесса. В городских районах (со значительными уровнями  $SO_2$ ) сухое кислотное осаждение является наиболее важным фактором, способствующим растворению карбонатного камня, тогда как в сельских районах (при незначительном высыхании с сухой кислотой) в большинстве случаев растворение карста доминирует над нейтрализацией кислотного дождя. Эксперименты с лабораторными экспозициями подтвердили, что, хотя вклад свободной кислотности является значимым при значениях  $pH$  менее 4,5, карстовый эффект является основным фактором, влияющим на выветривание известняка, в условиях, ограниченных только мокрым осаждением. Хотя  $CO_2$  является естественной составляющей атмосферы, и обычно не считается загрязнителем воздуха, за исключением, процессов, связанных с изменением климата, местное увеличение парциального давления атмосферного  $CO_2$  увеличивает количество растворенного  $CO_2$  [43,44].

*Озон.* Данное вещество не играет прямой роли в ухудшении состояния природных камней, однако, он является сильным окислителем. Озон ускоряет образование сульфатов на поверхности кальцита в  $\text{SO}_2$ -содержащих атмосферах, как при влажных, так и в сухих условиях [43,44].

*Аммиак.* Аммиак не оказывает прямого влияния на разрушение природного камня, но влияет на водное окисление  $\text{SO}_2$ . Увеличивая pH поверхности и воды, содержащейся в порах материала, растворение и последующее окисление  $\text{SO}_2$  усиливаются [V. Fassina, 1988]. Было также высказано предположение, что аммиак нитрифицируется в азотную кислоту микроорганизмами, тем самым увеличивая выветривание строительных камней [43,44].

*Хлористый водород.* Роль соляной кислоты в разрушении камня никогда не изучалась подробно, так как из-за отсутствия атмосферных измерений и потому, что хлориды (кроме NaCl) редко встречаются в качестве продукта ухудшения (из-за их высокой растворимости, например 2790г/л для  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) [43,44].

#### **1.4 Анализ влияния процесса адгезии пыли на загрязнение зданий и сооружений**

Одним из основных процессов, который протекает в атмосферном воздухе и негативно воздействует на внешний облик зданий и сооружений, является адгезия – взаимодействие частиц пыли с твердой поверхностью. Атмосферный аэрозоль городской среды (ААГС) [21], оседающий на вертикальных поверхностях строительных конструкций, является составной частью адгезионного процесса и представляет собой как частицы пыли природного и антропогенного происхождения, так и целый спектр загрязняющих агентов, среди числа которых сажа, бактерии,

вирусы и другие контаминанты. В отсутствие адгезии данная пыль при её осаждении на различные поверхности непрерывно возвращалась бы в атмосферу за счёт воздушных течений и ее концентрация в атмосферном воздухе достигла бы огромной величины [51–56,111].

Исследования [11,100,106] подтверждаются рисунками 1.2–1.3, на которых представлены фотографии зданий во время ремонта их фасадов. В результате налипания пыли на вертикальных поверхностях сооружений со временем формируются тёмные отложения, представляющие собой скопление твердых частиц, что приводит к нежелательным эстетическим эффектам, а также ставит под угрозу целостность материалов (рисунок 1.2 – правая часть здания; рисунок 1.3 – левая часть здания) [11,100,106].



Рисунок 1.2 –Здание во время ремонта фасада, г. Волгоград



Рисунок 1.3 – Здание во время ремонта фасада, г. Волгоград

Агрессивность налипших в результате адгезионного процесса на вертикальные поверхности зданий и сооружений частиц зависит от их состава, размера, гигроскопичности и растворимости. Например, осаждение кислот, таких как серная и азотная, может привести к локальным процессам коррозии на конструкциях из камня, стекла, металла. С другой стороны, воздействие пыли, содержащейся в городской воздушной среде, может вызвать химическую эрозию декоративных материалов посредством адсорбции газов или твердых частиц [47,70,105]. Характеристика твердых сред в зависимости от их растворимости и гигроскопичности приведена в [84]. В таблице 1.1 [80] содержатся приблизительные размеры частиц пыли и примесей от различных видов производств, содержащиеся в атмосферном воздухе городской среды. Согласно данным значениям, несмотря на антропогенный характер источников происхождения [19], размер некоторых частиц превышает 100 мкм, что может быть объяснено аутогезией – взаимодействием частиц между собой [52]. Наиболее опасными для многих видов поверхностей

фасадов зданий и сооружений являются абразивные частицы, получившие данное свойство в результате механической обработки [102].

Таблица 1.1 – Размеры твердых частиц от различных видов производств

№	Наименование производства	Размеры частиц, мкм
1	Выбросы от автомобильного транспорта	1-150
2	Асбест	0,7-90
3	Глина	0,1-50
4	Дым от автотранспортных средств на дровяном отоплении	до 2,5
5	Дым от горения смолы	0,01-1
6	Копоть (сажа)	0,01-0,1
7	Порошок железных опилок	4-20
8	Пыль древесного угля	0,2-3
9	Пыль металлургическая	0,1 и более
10	Пыль свинцовая	2
11	Пыль угольная	1-100
12	Пыль цементная	3-100
13	Угольная сажа	0,2-10
14	Угольные газообразные продукты горения	0,08-0,2
15	Цинковая (известковая) пыль	0,7-20

Воздействие пыли с диаметром частиц более 10 мкм на здания с позиции механического воздействия можно считать менее агрессивным, чем воздействие мелкодисперсной пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, т.к. данные частицы обладают меньшей абразивностью и легче удаляются с фасадов строительных конструкций, в том числе самостоятельно, благодаря ветровым воздействиям и



атмосферным осадкам [87–92,105]. Однако, с позиции химического воздействия крупнодисперсные частицы могут нанести большой вред в связи с их гигроскопичностью и адсорбционной способностью, т.к. они могут поглощать в себя большее количество агрессивных для строительных объектов химических веществ [105]. На основании исследований, проведенных в Греции [110], установлено процентное содержание загрязняющих веществ в двух образцах пыли – взвешенные вещества, в состав которых входят все размерные фракции пыли, а также мелкодисперсная пыль  $PM_{10}$  с максимальным диаметром частиц 10 мкм. Пыль была отобрана с наружных стен Храма Святой Софии в Салониках. Очередность процентного содержания ионов приблизительно одинаковая для обоих образцов пыли:  $SO_4^{2-} \rightarrow NO_3^- \rightarrow Cl^- \rightarrow Ac \rightarrow For \rightarrow Ox$  (рисунок 1.4) [110]. Карбоновые органические анионы с низкой молекулярной массой, Ac – ацетаты, For – формиаты, Ox – оксалаты, содержатся в атмосфере городов в высоких концентрациях. Они способствуют подкислению осадков, а также формированию чёрных отложений на фасадах зданий и сооружений, что несомненно влияет на ухудшение внешнего облика строительных конструкций [110].

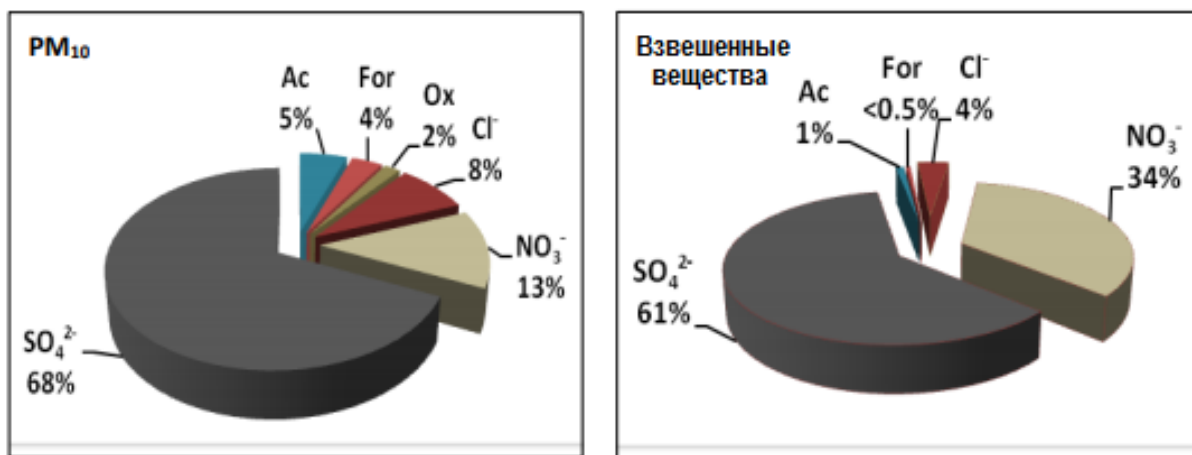


Рисунок 1.4 – Процентное содержание отдельных ионов в двух образцах пыли: слева–частицы  $PM_{10}$ ; справа–взвешенные вещества

## 1.5 Загрязнение зданий и сооружений как элемент визуальной экологии

При исследовании загрязнения зданий и сооружений, расположенных в городской среде, для достижения наилучших результатов в данной сфере необходимо рассматривать в совокупности физический аспект, учитывающий ухудшение внешнего облика фасадов строительных объектов по причине пылевого осаждения, а также визуальный аспект, охватывающий зрительное и психоэмоциональное восприятие человеком окружающей его среды [19]. Визуальная экология (видеоэкология) представляет собой науку, исследующую и объясняющую природу механизмов зрения с позиций новейшей психофизиологической науки, а также дающую теоретические основы для разработки экологических принципов построения материальных объектов, отвечающих нормам комфортного визуального восприятия среды, окружающей человека. Основоположником данного научного направления является российский учёный Филин В.А. [19,36,99].

Одной из задач исследований данного феномена является поиск методов оценки визуальной среды. Это осложняется фактором субъективизма – различием вкусов, культурных традиций, уровня образования, мировосприятия, возраста и пола и др. Первая попытка оценки качества визуальной среды техническими средствами была предпринята В.А. Филиным, предложившим частотно–спектральный анализ, позволивший сравнивать видимую городскую среду с «эталонной», в качестве которой принимается естественная природная среда [99]. Информативны методы структурно–информационного анализа, применяемые Г. Азгальдовым [20] для оценки архитектурной среды (квалиметрия) и К. И. Эрингисом, А. Будргонасом для «детального структурного исследования элементарных единиц пейзажа» [36]. Работники Брянского регионального центра «Экология визуальной среды» под руководством А.В. Городкова предложили методику оценки агрессивности

визуальных полей городской среды. Данный метод разработан с учетом существующих вариантов структурно-информационного анализа и критериев формирования комфортной визуальной среды, предлагаемых В.А. Филиным по результатам проведенных исследований о влиянии видимых объектов на автоматизацию саккад (свойство глазодвигательного аппарата совершать быстрые движения глаз произвольно в определенном ритме в бодрствующем состоянии при наличии и отсутствии зрительных объектов и во время парадоксальной стадии сна) [35].

В данной работе исследования, посвящённые изучению физического аспекта загрязнения зданий и сооружений содержащимся в воздухе атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС), представлены в главах 3 и 4. Рассмотрим визуальный аспект загрязнения строительных конструкций. Наибольшей значимостью при данных исследованиях обладает та часть фасада здания, которая оказывается в зоне зрительного восприятия, т.е. первые этажи объекта [36]. Согласно [92], в зоне примагистральной территории до уровня 3 этажа зданий наблюдаются наивысшие значения концентрации атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС). Данные сведения демонстрируют наибольшее загрязнение именно находящейся в зоне зрительного восприятия части здания.

Для оценки ухудшения состояния вертикальных поверхностей используется «серая шкала», разработанная сотрудниками ЛНИИ АКХ им. К.Д. Памфилова (рисунок 1.5) [94,95]. Согласно данной шкале, оценка степени загрязнения вертикальной поверхности производится по 10-бальной системе, где № 1 – поверхность после очистки или ремонта, № 10 – загрязнения превышают 70% всей площади вертикальной поверхности. Важным критерием, позволяющим оценить степень загрязнения строительных конструкций, является светлота их поверхностей, которая представляет собой субъективную яркость участка вертикальной поверхности, отнесённую к субъективной яркости аналогично освещённой вертикальной поверхности, которая воспринимается человеком как белая. Шкала

прикладывается к поверхности фасада на трёх–пяти участках каждого этажа. Фасад считается приемлемо чистым, если внешний вид поверхности соответствует позициям шкалы №№ 1–5. После очистки фасадов зданий, окрашенных в светлые тона, степень загрязнения не должна быть выше позиции шкалы № 3. Качество очистки фасадов, которые окрашены в цельные колера, а также не содержащие белого цвета, согласно [94,95], определялось визуально при внешнем осмотре вертикальных поверхностей.

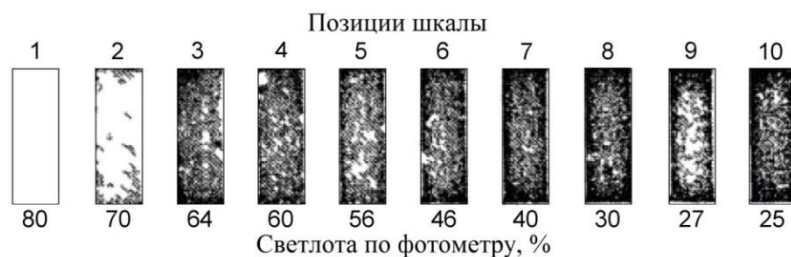


Рисунок 1.5 – «Серая шкала»

В данной работе исследуется загрязнение зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды. Ухудшение внешнего облика строительных конструкций по причине биоповреждений [49], выцветания, кислотных осадков и других природно–климатических факторов может быть устранено во время ремонта разрушенных участков фасада.

## 1.6 Существующие проектные решения и нормативы по внешнему виду зданий и сооружений

Данные, содержащиеся в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году» [40] свидетельствуют о

сохранении высокого уровня подверженности строительных объектов и архитектурных памятников негативному воздействию экологических факторов и увеличиваются с каждым годом, преимущественно за счет антропогенных факторов.

В соответствии с концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 года от 17 ноября 2008 года №1662-р, среди прочих выделяются следующие направления: «Создание единой информационной системы общероссийского мониторинга состояния и использования объектов культурного наследия, памятников истории и культуры» [65].

На основании статьи 33 ФЗ № 73 (ред. от 18.10.2010), «Объекты культурного наследия подлежат государственной охране в целях предотвращения их повреждения, разрушения или уничтожения, изменения облика и интерьера, нарушения установленного порядка их использования, перемещения других действий, могущих причинить вред объектам культурного наследия, а также в целях их защиты от неблагоприятного воздействий окружающей среды и иных негативных воздействий» [98].

В соответствии с Федеральным Законом № 7 (ред. от 18.10.2010) «Об охране атмосферного воздуха» (глава 1, статья 4): «Особой охране подлежат объекты, включенные в Список всемирного культурного наследия и Список всемирного природного наследия, объекты, имеющие особое природоохранное, научное, историко-культурное, эстетическое, рекреационное и иное ценное значение» [97]. Выполняя требования данной статьи, необходимо производить государственный контроль и наблюдение за объектами, подверженными негативному воздействию, и классифицировать их в зависимости от уровня и объема негативного воздействия на окружающую среду, в которую входят памятники истории и культуры.

Согласно ст. 7 Международной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [63] к основным направлениям деятельности сторон, подписавших данный документ, относятся исследования и разработка воздействия

загрязняющих веществ не только на здоровье людей, но и объекты окружающей среды, в том числе здания и сооружения, а также сельское и лесное хозяйство, материалы, природные экосистемы, а также создание научной основы для установления соотношений доза – эффект в целях охраны окружающей среды.

Ухудшение внешнего облика зданий и сооружений связано с воздействиями различного происхождения. Фасады строительных конструкций ежедневно подвергаются атмосферным (осадки), климатическим (перепады температуры), сейсмическим влияниям, воздействию содержащихся в воздушной среде вредных веществ (пыль, выбросы промышленных предприятий, выхлопные газы транспортных средств), воздействию биологических факторов (плесень), вибрациям, ударам, взрывам, коррозированию и др. Данные факторы негативно влияют на внешний вид зданий, а также на срок службы материалов, из которых оно выполнено. В связи с этим разработан нормативный документ ВСН 58-88р [32], в котором установлены состав и порядок функционирования системы технического обслуживания, ремонта и реконструкции жилых зданий, объектов коммунального и социально–культурного назначения, независимо от ведомственной принадлежности и форм собственности, а также установлена минимальная продолжительность эффективной эксплуатации зданий, сооружений и их элементов. На основании [32], для зданий при нормальных условиях эксплуатации (жилые дома, а также здания с аналогичным температурно-влажностным режимом основных функциональных помещений) срок эксплуатации до постановки на текущий ремонт, включающий ремонт фасадов зданий, составляет 3–5 лет. Для зданий при благоприятных условиях эксплуатации, при постоянно поддерживаемом температурно-влажностном режиме (музеи, архивы, библиотеки и т.п.) срок эксплуатации до постановки на текущий ремонт также составляет 3–5 лет.

В соответствии с Федеральным законом от 25.06.2002 N 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской

Федерации», Положением о зонах охраны объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации для Волгоградской области установлены нормативы, утверждающие границы зон охраны объектов культурного наследия регионального значения, а также требования к режимам использования земель и градостроительным регламентам в границах зон охраны таких объектов, как «Здание бывшего совнархоза» – 60-е гг. XX века [76], «Комплекс застройки пр. Ленина, 4–59» – 1950-е гг. [78], «Железнодорожная станция Ельшанка» – начало XX века [77], «Здание гидромелиоративного колледжа» – 1958 г. [74], «Пожарная часть «Общество «Труд» – конец XIX века [75] и другие. В соответствии с данными нормативами [74–78], сохранение и восстановление сложившихся в охраняемом природном ландшафте открытых и закрытых пространств в целях обеспечения визуального восприятия объектов культурного наследия в его историко-градостроительной и природной среде осуществляется за счёт таких мер, как, например, осуществление работ, связанных с сохранением и восстановлением планировки зданий, сооружений и благоустройством территории, формирующей историческую среду и окружение объекта, а также обеспечением других форм благоустройства, вызванных требованиями современного использования, но не нарушающих исторически ценную градостроительную среду.

Информация по организации и выполнению работ по очистке от загрязнений фасадов зданий и сооружений с последующим ремонтом поврежденных участков при проведении текущего ремонта строительных объектов, находящихся в эксплуатации, содержится в типовых технологических картах, составленных работниками ЛНИИ АКХ им. К.Д. Памфилова, которые введены в действие в 1974 году: №7 «Очистка от загрязнений фасадов зданий, окрашенных перхлорвиниловыми красками» [94], №8 «Очистка от загрязнений облицованных фасадов зданий» [95], которые отделаны как естественным камнем (гранит, мрамор, песчаник, известняк), так и искусственными материалами (кирпич красный,

силикатный, лицевой, терразит, керамические и бетонные плиты). На основании [94,95], для повышения срока службы зданий и улучшения их внешнего облика необходимо не реже одного раза в три года в летние месяцы производить очистку их фасадов от загрязнений с одновременным ремонтом поврежденных участков.

Законодательной базой, обязывающей арендаторов и собственников зданий и сооружений поддерживать фасады в надлежащем состоянии, является Закон города Москвы № 22 «О поддержании в исправном состоянии и сохранении фасадов зданий и сооружений на территории города Москвы». Нормативная база для исполнения данного закона изложена в ЖНМ 2007/03 [48,73]. Данный норматив является наиболее информативным относительно внешнего вида зданий и сооружений и устанавливает режим и основные методы очистки фасадов строительных конструкций. Например, очистка и промывка фасадов зданий и сооружений может осуществляться механическим способом (пескоструйный метод, специальные чистящие агрегаты, аэрогидродинамическая технология) и с применением специальных моющих средств. Применение очистки сухим песком в связи с наносимым экологической обстановке вредом допускается применять в исключительных случаях – на облицовках с не шлифованными фактурами, преимущественно из твердых каменных пород [48,73]. На основании [48], периодичность очистки вертикальных поверхностей устанавливается на основании плановых и внеплановых осмотров. Плановые осмотры должны проводиться один раз в год в период подготовки к весенне–летней эксплуатации объекта. Внеплановые обследования фасадов проводятся после стихийных бедствий, а также при обнаружении дефектов, вызванных механическими воздействиями на объект.

Таким образом, существующие нормативы по регламенту внешнего вида зданий и сооружений имеют место лишь в отдельных регионах РФ, например, Волгоградской, Воронежской, Пермской, Челябинской, Свердловской и других областях, и, зачастую применимы для отдельных строительных объектов. Однако,



часто они носят необязательный характер, а также в них отсутствует ряд важных положений, к примеру, данных по методике и средствам очистки фасадов. Наиболее информативным и результативным является используемый в г. Москве норматив [48], устанавливающий режим и основные методы очистки фасадов строительных конструкций.

### **1.7 Обоснование и выбор направления исследования**

В настоящее время в связи с воздействием на воздушную городскую среду таких антропогенных факторов, как промышленность, транспорт, сельское, коммунально-бытовое хозяйство и др. внешний облик зданий, сооружений и памятников архитектуры нуждается в защите. Атмосферный аэрозоль городской среды (ААГС), содержащийся в воздухе, является одной из главных причин ухудшения состояния фасадов строительных конструкций. Изложенное выше послужило основанием для выбора направления исследования, которое заключается в изучении закономерностей загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений пылью. Для достижения цели были поставлены следующие задачи исследования:

1. Анализ литературных источников для выявления степени научной разработанности темы исследования, посвященной изучению загрязнений зданий и сооружений, расположенных в городской среде.
2. Теоретические и экспериментальные исследования процесса адгезии (налипания и отрыва) городской пыли на оштукатуренной, окрашенной, стеклянной и металлической вертикальных поверхностях.
3. Анализ основных свойств пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, климатических факторов и других условий протекания процесса

адгезии (налипания и отрыва) городской пыли на различных вертикальных поверхностях зданий и сооружений.

4. Натурные исследования загрязнения пылью наиболее характерных для городской среды вертикальных поверхностей.

5. Экспериментальные исследования возможности существования диапазонов направлений воздушного потока к вертикальной поверхности зданий и сооружений, при которых происходит налипание частиц городского атмосферного аэрозоля, и диапазонов, при которых осуществляется отрыв данных частиц.

6. Разработка методик и программы для расчёта текущего загрязнения и прогнозирования загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений в будущем, а также оценки степени ухудшения их внешнего облика.

7. Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

## **1.8 Выводы по главе 1**

1. Анализ литературных источников показал, что пыль является одним из главных аспектов ухудшения внешнего облика расположенных в городской среде зданий и сооружений, и в совместном действии с другими физико-химическими и механическими факторами воздействия на строительные конструкции способствует их дальнейшему разрушению.

2. Существующие нормативы, отвечающие за внешний вид расположенных в городской среде зданий и сооружений, имеют место лишь в отдельных регионах РФ или для конкретных объектов.

3. Вопросы, связанные с исследованием адгезионного воздействия пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды на вертикальных поверхностях зданий и сооружений, являются недостаточно изученными.

4. Выбор направления исследования определен необходимостью изучения закономерностей загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений содержащимся в воздухе атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС), т.к. это является основой для сохранения внешнего облика строительных объектов, которые демонстрируют архитектурные, конструктивные особенности различных исторических периодов развития страны.

## **ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

### **2.1 Теоретические основы процесса адгезии ААГС на вертикальных поверхностях зданий и сооружений**

Одним из основных процессов, который протекает в атмосферном воздухе и негативно воздействует на внешний облик зданий, сооружений и архитектурных памятников, является адгезия. Адгезия частиц пыли (порошков) – это взаимодействие микроскопических частиц с твердой поверхностью, обусловленное силами, зависящими как от свойств контактирующих тел, так и от свойств среды. Процесс взаимодействия частиц между собой называют аутогезией. Родственным для адгезии и аутогезии процессом является когезия – это взаимодействие между молекулами в объеме одного тела. Адгезия оказывает влияние на процессы, протекающие в природе. В отсутствие адгезии пыль, осаждающаяся на землю, непрерывно бы возвращалась в атмосферу воздушными течениями и ее концентрация в воздухе достигла бы огромной величины [51–56,111]. Определяющие адгезионное взаимодействие силы подразделяют на две группы. Первая группа частиц обуславливает взаимодействие частиц с поверхностью до непосредственного соприкосновения тел. Величина данных сил резко убывает с увеличением расстояния между контактирующими поверхностями. К данным силам относятся частично кулоновские и молекулярные силы. Вторая группа сил возникает исключительно при контакте частиц с поверхностью. К ним относятся капиллярные

силы и силы электрического взаимодействия за счет двойного слоя в зоне контакта [51–56,111].

Адгезию классифицируют по различным признакам: свойства среды, определяющие адгезию силы, число прилипших к поверхности частиц, изменение адгезии в процессе отрыва, направление отрывающей силы и другие [51–56,111]. Силы адгезии определяются *свойствами окружающей среды* в значительной степени. Например, в воздушной (газовой) среде адгезия частиц значительно выше, чем в водной [51–56,111]. Адгезия обусловлена *различными по своей природе силами*. Отдельные составляющие сил адгезии могут в определенных условиях превалировать над другими. Например, при влажности воздуха свыше 70 % увеличение адгезии микроскопических частиц обусловлено капиллярными силами. Если частицы сильно заряжены, величина кулоновских сил превышает другие составляющие сил адгезии [51–56,111]. Адгезию также можно классифицировать *по числу взаимодействующих частиц*. Если частиц немного, то они чаще всего не контактируют между собой и образуют на поверхности *монослой*. Если частиц много, то образуется слой, состоящий из одного или нескольких рядов частиц, вступающих друг с другом в контакт. Данный процесс является аутогезионным взаимодействием [51–56,111]. В зависимости от изменения взаимодействия контактирующих тел в процессе отрыва различают *кинетическое и статистическое прилипание*. Кинетическое прилипание характеризуется взаимодействием между частицей и поверхностью в момент отрыва. Статистическое прилипание характеризуется силой сопротивления началу отрыва. Для начала отрыва частицы необходимо преодолеть силу статистического прилипания, поскольку она всегда больше силы кинетического прилипания [51–56,111]. Отрыв частиц пыли (статистическое прилипание) зависит от направления действия и величины силы, приложенной к частице. Если силы приложены нормально к поверхности, для отрыва необходимо выполнение следующего условия:  $F_{отр} > F_{ад}$ . При тангенциально направленной силе действует

момент сил:  $M_{отр} = F_{тан} \cdot r$ , где  $r$  – радиус частицы. Первой стадией отрыва частицы от поверхности будет ее скольжение или качение (преодоление сил прилипания и сил трения) [51–56,111].

Процесс адгезии монодисперсных частиц характеризуется величинами [51–56]:

– Число адгезии ( $\gamma_F$ ) – это отношение числа оставшихся частиц после воздействия отрывающей силы к первоначальному числу частиц, которые находились на исследуемой поверхности [51–56]:

$$\gamma_F = \left( \frac{N}{N_0} \right) \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

где  $N$  – число оставшихся частиц после воздействия отрывающей силы;

$N_0$  – первоначальное число находящихся на образце частиц.

– Число  $\alpha_F$ , которое равно отношению числа отрывающихся частиц после воздействия силы к первоначальному числу частиц, которые находились на исследуемой поверхности [51–56]:

$$\alpha_F = \frac{N - N_0}{N_0} \cdot 100 = 100 - \gamma_F, \% \quad (2.2)$$

Число адгезии полидисперсных частиц может быть представлено как среднее арифметическое чисел адгезии для монодисперсных частиц [51–56]:

$$\bar{\gamma}_F = \sum_{i=d_i}^{i=d_n} \gamma_F \left( \frac{d_i}{n} \right) \quad (2.3)$$

Расчёт числа адгезии полидисперсных частиц без ущерба для точности Зимон А.Д. предлагает определять по упрощённой формуле [51–56]:

$$\bar{\gamma}_F(d) = ae^B \quad (2.4)$$

где  $a$  – параметр, связывающий адгезионное взаимодействие с условием отрыва частиц [52];

$B$  – постоянная величина [52].

Однако, Зимон А.Д. исследовал, в основном, взаимодействие стеклянных частиц с твёрдой поверхностью, дисперсный состав которых подчиняется логарифмически–нормальному закону распределения. Дисперсный состав атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС), как правило, не подчиняется данному закону распределения [10,13,15,16]. Тогда использование зависимостей для расчёта числа адгезии ААГС требует проведения экспериментальных и натурных исследований. Поэтому уместно говорить не о числе частиц и доле числа частиц, а об их массе и доле массы. По аналогии с Зимоном А.Д. [52,56] будем понимать под числом адгезии массовую долю от налипших ранее частиц, которые остались на поверхности после воздействия на неё внешних сил.

Как было сказано ранее, при исследовании отрыва частиц с твёрдой поверхности Зимон А.Д. [52,56] использовал число  $\alpha_F$ , показывающее долю числа частиц, которые отрываются под действием внешних сил, к первоначальному их количеству [52,56]. Аналогично с Зимоном А.Д., учитывая факт не подчинения дисперсного состава ААГС логарифмически–нормальному закону распределения [10,13,15,16], под величиной  $\alpha_F$  в данной работе будем понимать массовую долю частиц, которые отрываются с поверхности под воздействием внешних сил. При этом, на наш взгляд, уместно говорить о данной величине в единицу времени в связи с различным характером внешних воздействий. Таким образом, по аналогии с величиной  $\alpha_F$  обозначим массовую долю частиц городской пыли, которые отрываются с поверхности под действием ветра в единицу времени:

$$\gamma A_{\text{отр}} = \frac{d\alpha_F}{d\tau} \quad (2.5)$$

В случае налипания ААГС на вертикальные поверхности, по аналогии с Зимоном А.Д. [52,56], обозначим массовую долю налипших частиц городской пыли к пыли в набегающем на поверхность воздушном потоке:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})} = 1 - \alpha_F \quad (2.6)$$

Взаимодействия твердых частиц с поверхностью Зимон А.Д. предложил характеризовать силой  $F_{50}$ , обуславливающей отрыв или удержание 50% прилипших частиц  $\gamma_F = \alpha_F = 50\%$ , при логарифмически-нормальном законе распределения. В данном случае средняя сила адгезии имеет вид [52]:

$$F_{\text{ср}} = \frac{0,43}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{F_{\text{мин}}}^{F_{\text{макс}}} \exp \left[ -\frac{(\lg F_{\text{ад}} - \lg \bar{F})^2}{2\sigma^2} \right] d F_{\text{ад}} \quad (2.7)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение, характеризующее распределение частиц по размерам;

$\bar{F}$  – медианная сила, приближённо равная силе  $F_{50}$ .

Учитывая факт не подчинения дисперсного состава атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) логарифмически-нормальному закону распределения [10,13,15,16], автором были проведены расчёты по корректировке формулы (2.7) с учётом закономерностей закона распределения массы ААГС по эквивалентным диаметрам в разделе 2.2.3. Рассмотрим основные свойства ААГС, оказывающие наибольшее влияние на адгезионный процесс.

## 2.2 Исследование ААГС как составной части адгезионного процесса

### 2.2.1 Основные свойства ААГС

Как было упомянуто ранее, адгезией пыли называют взаимодействие частиц с твердой поверхностью. В данной работе для обозначения пыли, содержащейся в атмосферном воздухе города и оседающей на вертикальных поверхностях зданий и сооружений, используется термин атмосферный аэрозоль городской среды (ААГС) [21]. Анализ основных свойств ААГС, являющегося составной частью адгезионного



и аутогезионного процессов, можно считать основополагающим при исследовании загрязнения зданий и сооружений:

1. Дисперсность пыли – это степень измельчения твердых частиц. Под дисперсным составом понимают распределение частиц пыли по размерам, демонстрирующее, из частиц какого размера состоит данная пыль, и массу или количество частиц соответствующего размера. Дисперсность в значительной степени определяет свойства пыли, т.к. в результате измельчения изменяются некоторые свойства вещества, а также приобретаются новые. Это вызвано увеличением суммарной поверхности вещества, в результате чего возрастает поверхностная энергия. Это влечет за собой повышение физической и химической активности – интенсивно и быстро протекают реакции окисления вещества. В значительной степени дисперсный состав определяет характер и условия распространения пыли в воздушной среде. Мелкодисперсная пыль осаждается медленнее, чем крупнодисперсная, особо мелкодисперсная пыль практически не осаждается, постоянно находясь в воздухе. [31].

2. Различают истинную, кажущуюся, насыпную плотность пыли. Истинная плотность пыли – это масса единицы объема вещества, из которого образована данная пыль. Кажущаяся плотность представляет собой массу единицы объема частиц пыли, включая объем закрытых пор. Насыпная плотность – это масса единицы объема уловленной пыли, свободно насыпанной в емкость. В занимаемый пылью объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними [31].

3. Удельная поверхность – это отношение поверхности всех частиц к их массе или объему. Значение удельной поверхности позволяет судить о дисперсности пыли [31].

4. Аутогезия или слипаемость пыли – взаимодействие частиц пыли между собой. Аутогенный процесс способствует образованию конгломератов пыли. Он

обусловлен силами молекулярного, капиллярного электрического происхождения. [31,52].

5. Сыпучесть пыли характеризует подвижность частиц пыли относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы. Сыпучесть пыли зависит от размера частиц, их влажности и степени уплотнения [31].

6. Гигроскопичность пыли – это способность пыли поглощать влагу из воздуха. Поглощение влаги оказывает влияние на такие свойства пыли, как слипаемость, сыпучесть, электрическая проводимость и др. [31].

7. Смачиваемость пыли определяет возможность ее гидроудаления, применение мокрой пылеуборки различных помещений. Смачиваемость пыли определяется методом пленочной флотации. Он заключается в том, что в сосуд с дистиллированной водой высыпают навеску пыли и определяют количество осевшей пыли [31].

8. Абразивность пыли – это способность пыли вызывать истирание стенок конструкций и аппаратов, с которыми соприкасается пылегазовый поток. Она зависит от твердости и плотности вещества, из которого образовалась пыль, размера частиц, их формы, скорости потока [31].

### **2.2.2 Методика определения дисперсного состава пыли**

Методика определения дисперсного (фракционного) состава пыли, которая используется в диссертационной работе, производится на основании ГОСТ Р 56929-2016 [39]. Она основана на измерении величины частиц исследуемой пыли с помощью микроскопического метода путем фотографирования образцов, увеличенных в 200-2000 раз с помощью стереоскопического микроскопа МБС–10

с использованием фотоприставки. Обработанный снимок загружается в программный комплекс «Dust-1», который позволяет определять форму пылевидных частиц путем расчета площади, занимаемой частичкой [6,12,39,103]. Программа представляет результат в виде интегральных функций распределения частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке [6,12,39,103]. Программный комплекс «Dust-1» предназначен для проведения расчетного обоснования загрязнения воздушной среды и проектирования средств повышения уровня защищенности в зависимости от дисперсного (фракционного) состава пыли, выбрасываемой в атмосферный воздух [6,12,39,103].

Иная методика определения дисперсного (фракционного) состава пыли, также используемая в диссертационной работе, заключается в микроскопическом анализе отобранных проб пыли с использованием сканирующего электронного микроскопа Versa 3D. Кроме дисперсного состава данный прибор позволяет определить элементный состав исследуемых образцов при помощи метода сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM). Дисперсный (фракционный) анализ отобранных проб пыли производился по полученным в результате микроскопического исследования микрофотографиям с использованием специализированного программного комплекса «Image J» [68,109]. Далее при помощи ППП «STATISTICA» [28,29,68,109] было произведено графическое оформление результатов исследования. Проверка подчиняемости выборки логарифмически-нормальному закону распределения проводилась с помощью критериев согласия Пирсона и критерия Колмогорова.

Графический способ оформления результатов исследований предусматривает три вида построения [25]:

1. Интегральные кривые (каждая точка кривых демонстрирует процентное содержание частиц пыли большего или меньшего размеров).

2. Дифференциальные кривые (по оси абсцисс откладывают значения диаметров частиц, мкм; по оси ординат - плотность распределения частиц соответствующего размера, %).

3. Гистограмма (по оси абсцисс откладывают значения диаметров частиц, мкм; по оси ординат - долю частиц, соответствующих данному интервалу, в % или относительных единицах).

На рисунках 2.1–2.4 представлены интегральные функции распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам для пыли, отобранной с вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в городской и природной средах за зимний (рисунок 2.1), весенний (рисунок 2.2), летний (рисунок 2.3) и осенний (рисунок 2.4) периоды наблюдений с 2015 по 2018 гг. Данные о размерах частиц содержатся в таблице 2.1.

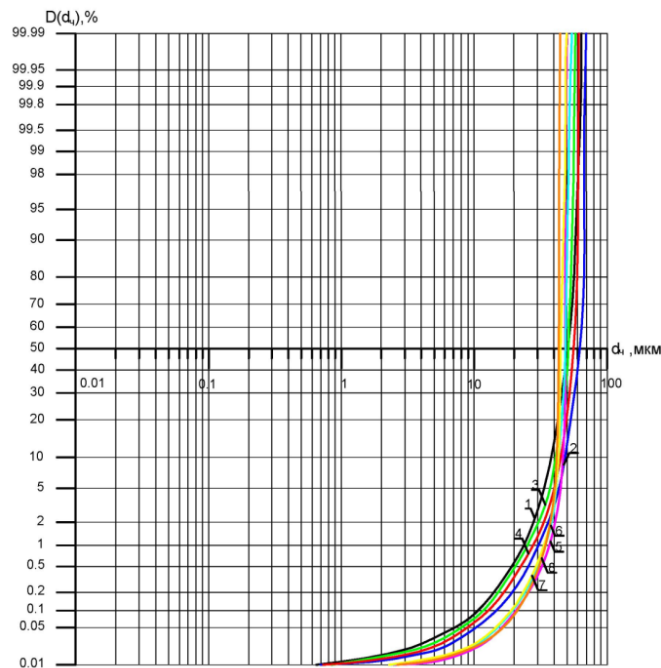


Рисунок 2.1 – Интегральные функции распределения массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам за зимний период: в городской среде 1–2015 г., 2–2016 г., 3–2017 г., 4–2018 г.; в природной среде 5–2015 г., 6–2016 г., 7–2017 г., 8–2018 г.

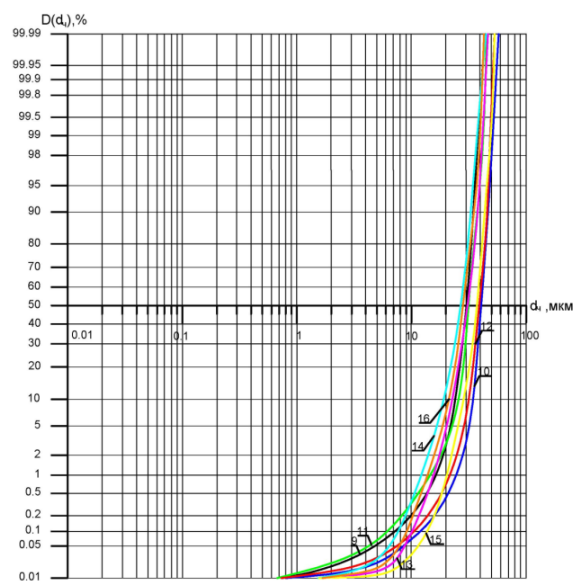


Рисунок 2.2 – Интегральные функции распределения массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам за весенний период: в городской среде 9–2015 г., 10–2016 г., 11–2017 г., 12–2018 г.; в природной среде 13–2015 г., 14–2016 г., 15–2017 г., 16–2018 г.

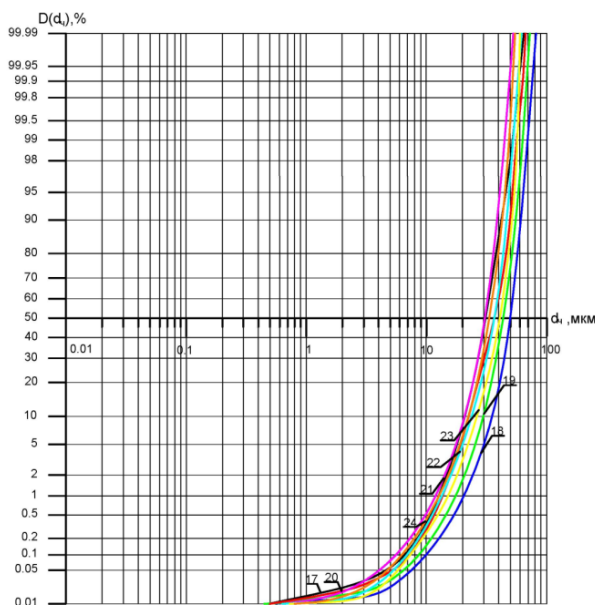


Рисунок 2.3 – Интегральные функции распределения массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам за летний период: в городской среде 17–2015 г., 18–2016 г., 19–2017 г., 20–2018 г.; в природной среде 21–2015 г., 22–2016 г., 23–2017 г., 24–2018 г.

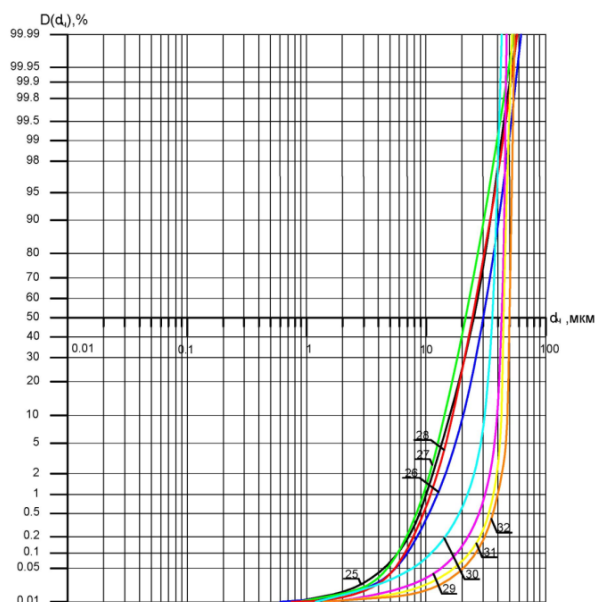


Рисунок 2.4 – Интегральные функции распределения массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам за осенний период: в городской среде 25–2015 г., 26–2016 г., 27–2017 г., 28–2018 г.; в природной среде 29–2015 г., 30–2016 г., 31–2017 г., 32–2018 г.

Таблица 2.1 – Размеры частиц пыли, отобранной с вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в городской и природной средах за зимний, весенний, летний и осенний периоды наблюдений с 2015 по 2018 гг.

Сезон	Площадка наблюдений	d <sub>ч</sub> , мкм	Период наблюдений			
			2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Зима	Городская среда	мин.	0.65	0.70	0.85	0.73
		макс.	65	70	58	63
	Природная среда	мин.	2.5	2.4	2.3	2.6
		макс.	51	55	50	45
Весна	Городская среда	мин.	0.75	0.80	0.68	0.73
		макс.	44	58	45	53
	Природная среда	мин.	1.73	1.68	1.70	1.75
		макс.	48	45	53	44
Лето	Городская среда	мин.	0.50	0.56	0.45	0.50
		макс.	65	81	73	67
	Природная среда	мин.	0.65	0.63	0.72	0.80
		макс.	53	62	60	55
Осень	Городская среда	мин.	0.80	0.60	0.85	0.75
		макс.	57	62	55	58
	Природная среда	мин.	1.77	1.25	1.53	1.48
		макс.	48	43	52	55

На рисунках 2.5 – 2.6 представлены дифференциальные функции и гистограммы распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам для пыли, отобранной с вертикальных поверхностей, расположенных в городской и природной средах. С целью сравнения, рассмотрим результаты образцов, отобранных в городской среде осенью 2015 г. (рисунок 2.5) и в природной среде осенью 2016 г. (рисунок 2.6). На рисунке 2.5 представлена гистограмма численного распределения частиц пыли, отобранной осенью 2015 г. в городе. Размер измеренных частиц находится в диапазоне от 0,79 мкм до 57 мкм. Преобладающими размерами частиц пыли являются 2,5–5 мкм (таблица 2.2). На рисунке 2.6 представлена гистограмма численного распределения частиц пыли, отобранной осенью 2016 г. в природной среде. Размер измеренных частиц находится в диапазоне от 1, 25 мкм до 43 мкм. Преобладающими размерами частиц пыли являются 8–10 мкм (таблица 2.3). Объем выборки составил 100 единиц в обоих случаях. Наблюдаемые значения критериев согласия Пирсона и критерия Колмогорова меньше теоретических значений данных критериев (таблицы 2.2–2.3), т.е. выборки подчиняются логарифмически-нормальному закону распределения. При этом размер частиц в природной среде более крупный, чем в городской [68,109].

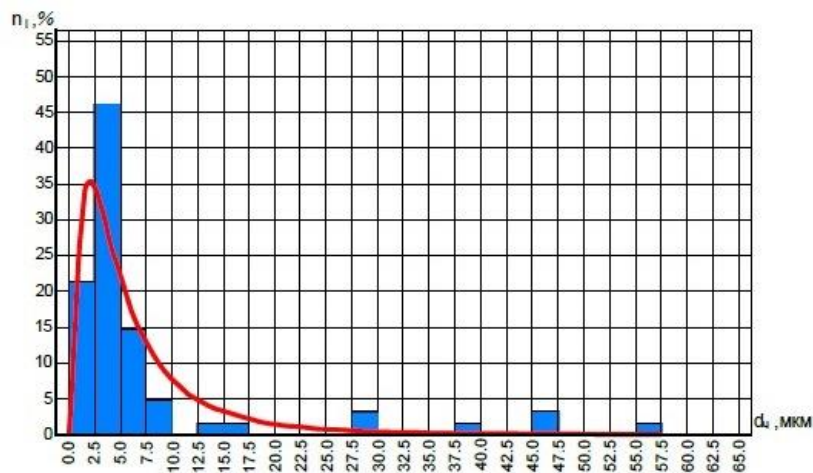


Рисунок 2.5 – Гистограмма численного распределения частиц пыли по эквивалентным диаметрам, отобранной осенью 2015 г. в городской среде

Таблица 2.2 – Значения критериев по результатам исследований осенью 2015 г.  
в городской среде

Критерий согласия Пирсона, $\chi^2$		Критерий Колмогорова	
Экспериментальное значение	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Теоретическое значение
13.00845	67.328	0.11476	0.13403

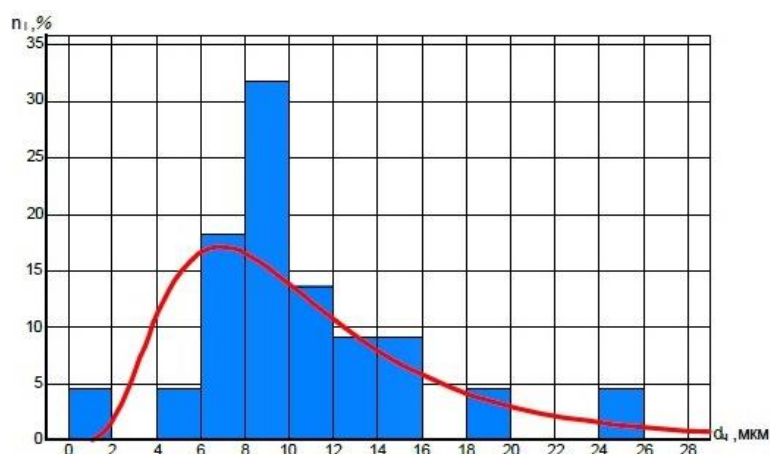


Рисунок 2.6 – Гистограмма численного распределения частиц пыли по эквивалентным диаметрам, отобранной осенью 2016 г. в природной среде

Таблица 2.3 – Значения критериев по результатам исследований осенью 2016 г.  
в природной среде

Критерий согласия Пирсона, $\chi^2$		Критерий Колмогорова	
Экспериментальное значение	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Теоретическое значение
11.31524	67.328	0.11763	0.13403

Исходя из гипотезы Колмогорова А.Н., выдающегося российского ученого XX века, в процессе дробления (измельчения) твердых частиц, распределение диаметров этих частиц асимптотически стремится к логарифмически-нормальному закону распределения, который выглядит следующим образом [62]:



$$D(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \int_{-\infty}^{\lg d} \exp \left[ -\frac{(\lg d - \lg d_{50})^2}{2 \lg^2 \sigma} \right] d \lg d \quad (2.8)$$

где  $d_{50}$  – медиана распределения;

$\lg d$  – стандартное отклонение логарифмов диаметров;

$\lg \sigma$  – среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

Однако, на основании исследований [10,13,15,16], а также построенных автором интегральных кривых, демонстрирующих распределение частиц массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам (рисунки 2.1–2.4), можно сделать вывод, что закон Колмогорова о логарифмически-нормальном распределении массы частиц по эквивалентным диаметрам наблюдается только на отдельных участках и для частиц более 1 мкм. Кривые могут быть представлены трехзвенным сплайном. В целом можно говорить о подчинении распределения массы частиц атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) по эквивалентным диаметрам усеченному логарифмически-нормальному распределению [3,4,7,10,14,68,109].

Усеченным логарифмически-нормальным распределением называется распределение, получаемое из классического логарифмически-нормального, при ограничении интервала возможных значений случайной величины. В общем случае усечение может быть: левым –  $(0; +\infty)$ ; двусторонним –  $(x_1; x_2)$ . Плотность распределения усеченного логарифмически-нормального закона имеет вид [72]:

$$\tilde{f}(x) = C \cdot f(x) \quad (2.9)$$

где  $f(x)$  – плотность распределения логарифмически-нормального распределения;

$C$  – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой  $\tilde{f}(x)$ , равна 1. Рассмотрим двустороннее усечение [72]:

$$\int_{x_1}^{x_2} \tilde{f}(t) dt = \int_{x_1}^{x_2} C f(t) dt = C \int_{x_1}^{x_2} f(t) dt = 1 \quad (2.10)$$

Из (2.10) выразим нормируемый множитель  $C$ :

$$C = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} f(t) dt} \quad (2.11)$$

Функция распределения для усечённого логарифмически–нормального закона имеет вид:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(t) dt = F(x_2) - F(x_1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\ln x_2 - \ln a}{\sigma}\right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\ln x_1 - \ln a}{\sigma}\right) \quad (2.12)$$

С учётом (2.12) нормируемый множитель для усеченного логарифмически–нормального распределения выглядит следующим образом:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{2} \left( \Phi\left(\frac{\ln x_2 - \ln a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln x_1 - \ln a}{\sigma}\right) \right)} \quad (2.13)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – интегральная функция Лапласа [1,57,96].

Учитывая подстановку (2.13) в (2.7), расчётная модель для определения средней силы адгезии для ААГС с учетом подчинения дисперсного состава ААГС усечённому логарифмически–нормальному закону распределения будет иметь вид:

$$F_{\text{ср}} = \frac{2}{\Phi\left(\frac{\lg F_{\text{макс}} - \lg \bar{F}}{0,43\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\lg F_{\text{мин}} - \lg \bar{F}}{0,43\sigma}\right)} \cdot \frac{0,43}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{F_{\text{мин}}}^{F_{\text{макс}}} \exp\left[-\frac{(\lg F_{\text{ад}} - \lg \bar{F})^2}{2\sigma^2}\right] dF_{\text{ад}} \quad (2.14)$$

### 2.2.3 Результаты исследования химического состава пыли

Наиболее информативным методом оценки химического состояния вертикальных поверхностей является элементный анализ, который производился с использованием

сканирующего электронного микроскопа Versa 3D. Элементный состав исследуемых образцов, отобранных с вертикальных поверхностей в городской и природной среде, был изучен методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM). Режим высокого вакуума (Hi Vac) с применением различных детекторов: вторичных, обратно рассеянных и проходящих электронов (ETD, CBS, STEM), позволяет получать изображения высокого разрешения металлических, композиционных и порошковых материалов [68,109].

На рисунке 2.7 изображена микрофотография пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период. Элементный состав каждой из выделенных частиц изучен отдельно. На рисунках 2.8–2.12 представлен спектральный анализ выделенных на микрофотографии частиц. Результаты исследования представлены в таблице 2.4.

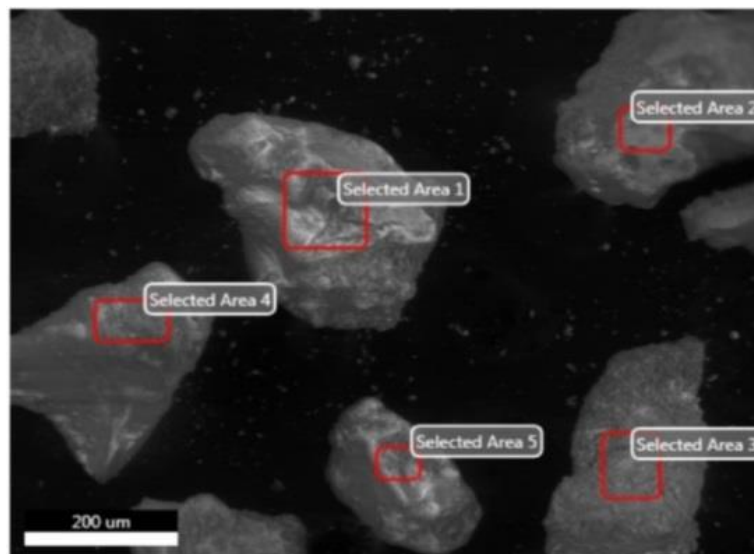


Рисунок 2.7 – Микрофотография пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период, 2016 г.

Таблица 2.4 – Элементный состав пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период 2016 г.

Элемент	Весовая доля, %					Атомная доля, %					Погрешность, %				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
C	18.86	7.55	16.1	14.63	13.11	27.58	12.26	24.29	22.72	19.39	10.46	28.14	9.67	9.14	10.36
O	48.17	45.36	52.05	49.77	54.64	52.89	55.32	58.95	58.02	60.66	8.77	8.37	9.18	9.54	8.14
Na	0.33	-	0.52	0.19	0.17	0.26	-	0.41	0.15	0.13	19.42	-	19.74	26.9	19.6
Mg	0.17	-	0.14	0.18	0.04	0.12	-	0.1	0.14	0.03	39.04	-	25.92	14.56	29.24
Al	1.01	0.73	1.88	1.33	1.29	0.66	0.53	1.26	0.92	0.85	6.23	5.84	5.5	5.94	4.92
Si	25.03	44.62	5.59	11.25	27.66	15.65	31	3.61	7.47	17.49	3.15	2.72	3.95	3.72	3.11
S	1.4	0.34	8.25	0.29	0.41	0.77	0.21	4.66	0.17	0.23	4.93	12.79	2.62	11.05	8.99
K	0.35	0.42	-	-	0.37	0.16	0.21	-	-	0.17	10.97	11.28	-	-	9.25
Ca	3.52	0.99	13.25	22.36	2.05	1.54	0.48	5.99	10.41	0.91	2.63	6.14	1.67	1.44	2.71
Fe	1.17	-	2.22	-	-	0.37	-	0.72	-	-	10.25	-	3.78	-	-
P	-	-	-	-	0.25	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-	12.6

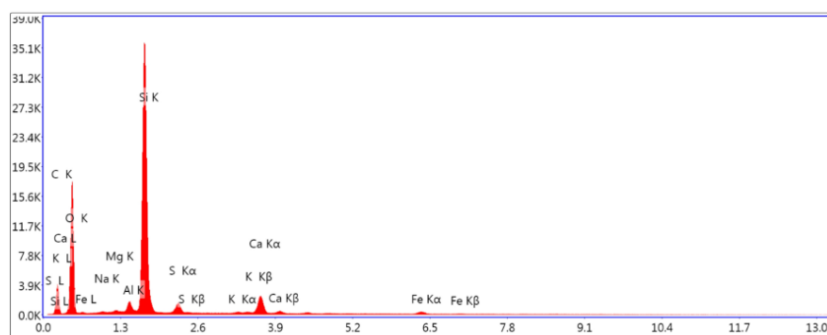


Рисунок 2.8 – Спектральный анализ образца пыли №1 за осенний период в городской среде

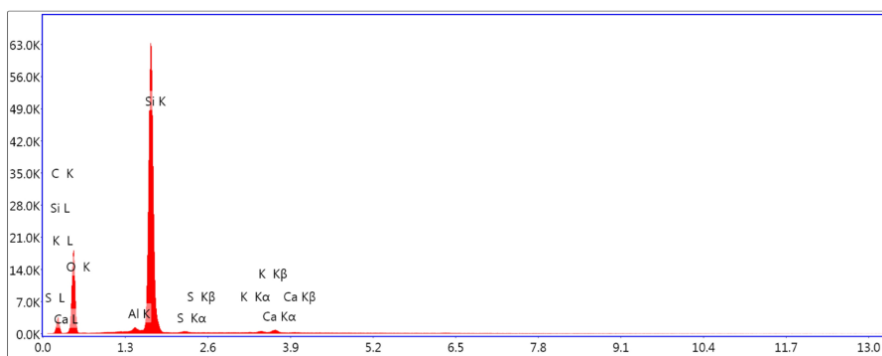


Рисунок 2.9 – Спектральный анализ образца пыли №2 за осенний период в городской среде

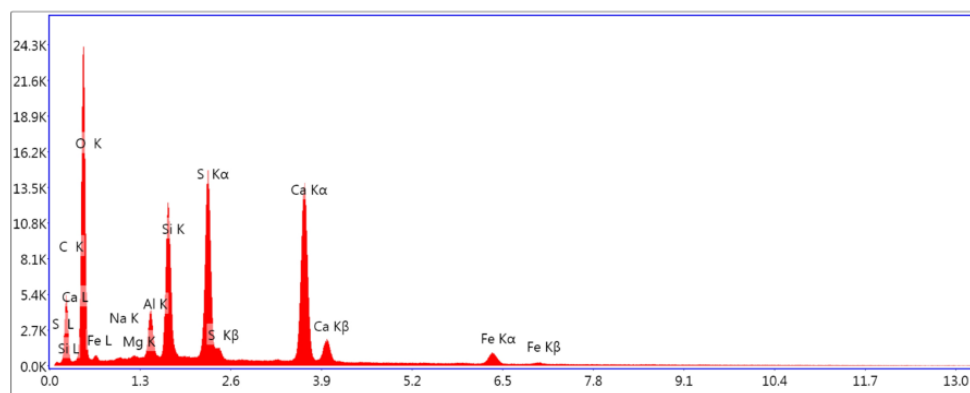


Рисунок 2.10 – Спектральный анализ образца пыли №3 за осенний период в городской среде

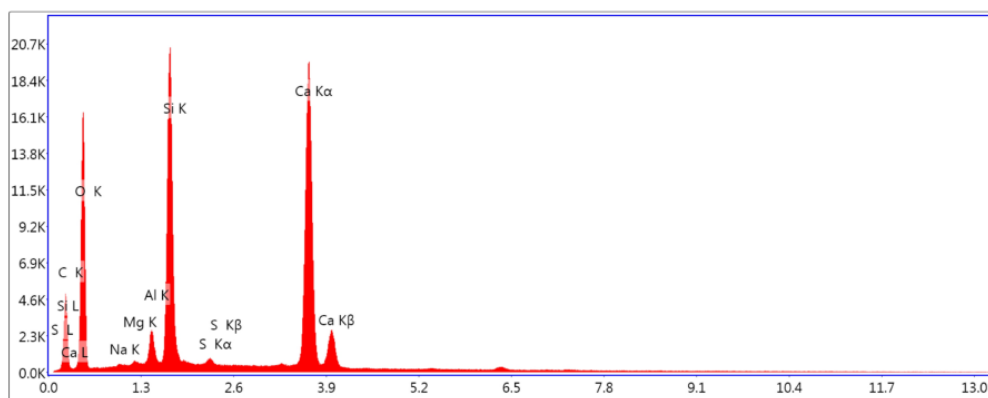


Рисунок 2.11 – Спектральный анализ образца пыли №4 за осенний период в городской среде

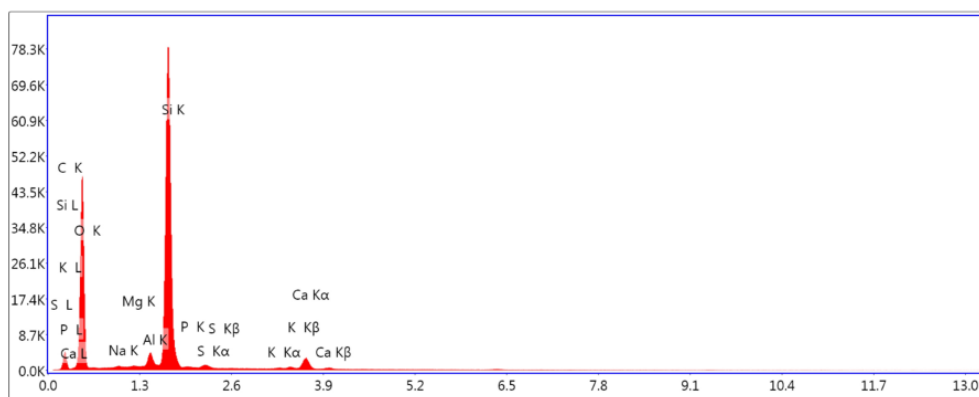


Рисунок 2.12– Спектральный анализ образца пыли №5 за осенний период в городской среде

На рисунке 2.13 изображена микрофотография пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период. Элементный состав каждой из выделенных частиц изучен отдельно. На рисунках 2.14–2.15 представлен спектральный анализ выделенных на микрофотографии частиц. Результаты исследования представлены в таблице 2.5.

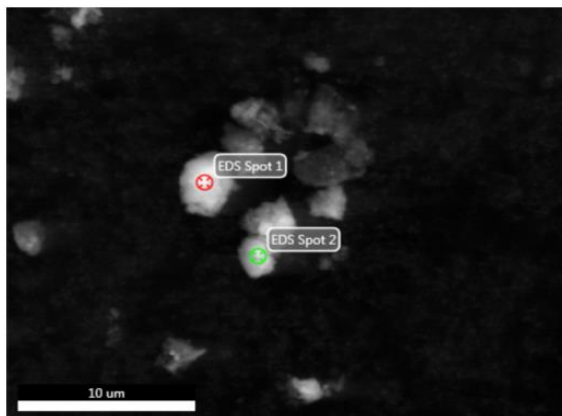


Рисунок 2.13 – Микрофотография пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период, 2016 г.

Таблица 2.5 – Элементный состав пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за осенний период 2016 г.

Элемент	Весовая доля, %		Атомная доля, %		Погрешность, %	
	1	2	1	2	1	2
C	28.44	41.66	40.22	54.02	6.94	7.33
O	45.24	38.01	48.03	37.01	9.76	9.71
Na	0.06	0.08	0.04	0.05	66.21	27.06
Mg	0.3	0.18	0.21	0.12	10.04	11.87
Al	0.43	1	0.27	0.58	7.41	5.39
Si	1.97	4.93	1.19	2.73	4.21	3.35
P	0.23	0.35	0.13	0.18	9.28	7.07
S	0.19	0.22	0.1	0.11	10.11	8.54
K	0.03	0.12	0.01	0.05	56.18	13.54
Ca	23.11	12.83	9.79	4.99	1.39	1.44
Fe	-	0.62	-	0.17	-	8.99

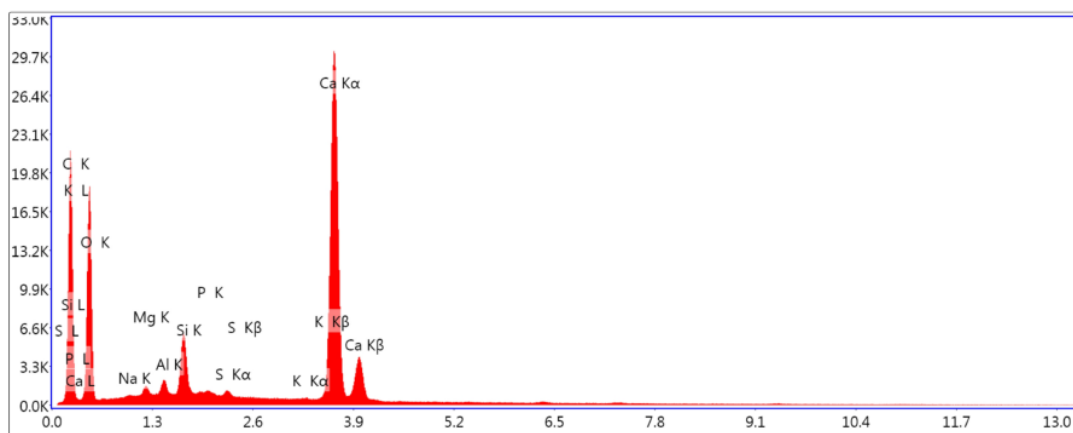


Рисунок 2.14 – Спектральный анализ образца пыли №1 за осенний период в городской среде

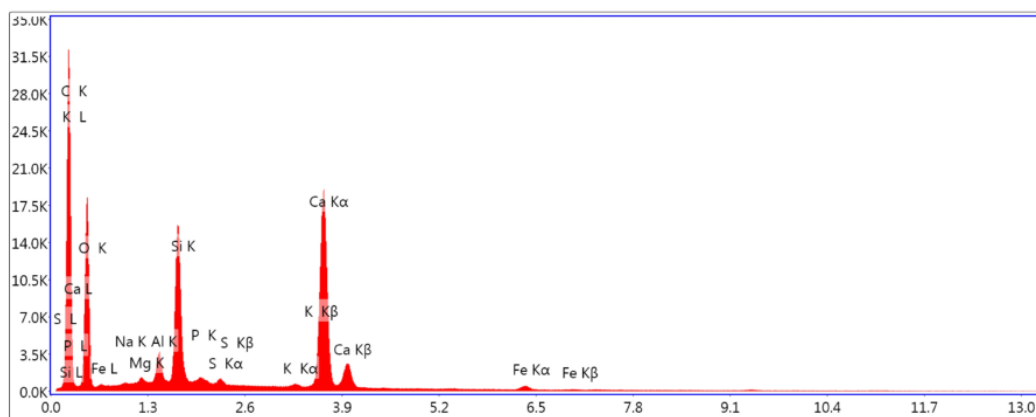


Рисунок 2.15 – Спектральный анализ образца пыли №2 за осенний период в городской среде

На рисунке 2.16 изображена микрофотография пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период. Элементный состав каждой из выделенных частиц изучен отдельно. На рисунках 2.17–2.21 представлен спектральный анализ выделенных на микрофотографии частиц. Результаты исследования представлены в таблице 2.6.

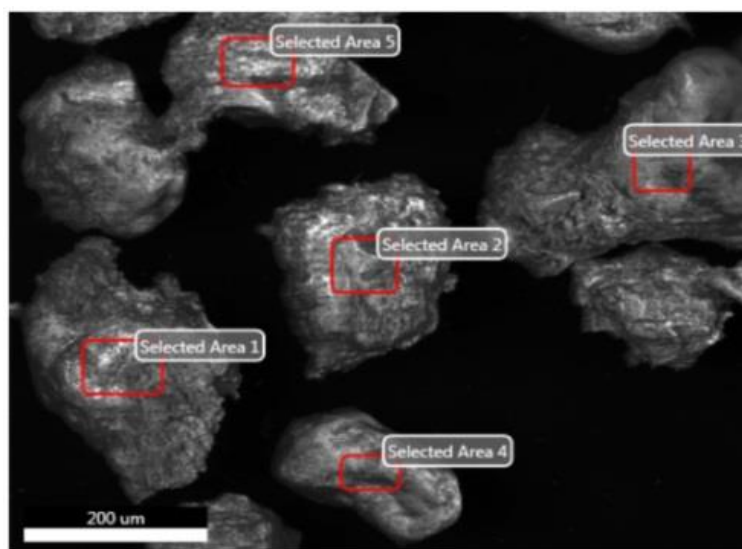


Рисунок 2.16 – Микрофотография пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период, 2016 г.

Таблица 2.6 – Элементный состав пыли с диаметром частиц более 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период 2016 г.

Элемент	Весовая доля, %					Атомная доля, %					Погрешность, %				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
C	15.06	18.96	22.36	24.4	21.84	24.02	28.04	32.74	34.78	32.79	9.67	10.09	10.6	9.85	9.47
O	44.9	45.42	40.61	43.72	42.41	53.79	50.44	44.63	46.79	47.81	9.27	8.65	8.95	8.83	9.37
Na	0.14	0.19	0.04	0.13	0.29	0.11	0.15	0.03	0.1	0.23	36.26	17.26	47	30.97	17.6
Mg	0.28	0.3	0.02	0.38	0.5	0.22	0.22	0.01	0.27	0.37	12.52	9.46	19.09	9.7	9.7
Al	1.86	4.34	1.12	1.84	3.08	1.32	2.86	0.73	1.17	2.06	5.77	4.65	5.17	5.13	5.24
Si	15.43	22.24	33.38	21.46	14.38	10.53	14.07	20.89	13.08	9.23	3.83	3.56	2.82	3.34	3.75
P	0.21	0.14	-	0.19	0.23	0.13	0.08	-	0.1	0.14	13.2	17.8	-	15.65	12.91
S	0.74	0.86	0.2	0.26	0.92	0.44	0.48	0.11	0.14	0.51	5.39	5.41	18.44	11.67	4.73
K	0.64	1.34	0.42	0.59	1.41	0.31	0.61	0.19	0.26	0.65	7.39	3.65	11.12	8.65	3.98
Ca	14.82	1.98	0.76	2.04	10.71	7.09	0.88	0.33	0.87	4.82	1.71	3.1	9.26	3.04	1.83
Fe	5.92	2.87	1.1	3.44	3.85	2.03	0.91	0.35	1.05	1.24	2.5	3.48	12.16	3.28	3.13
F	-	1.34	-	1.54	-	-	1.26	-	1.38	-	-	12.69	-	12.67	-
Ti	-	-	-	-	0.37	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-	14.03



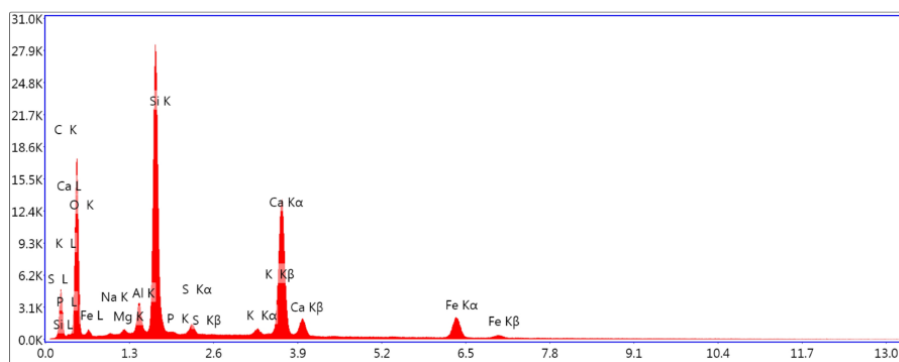


Рисунок 2.17 – Спектральный анализ образца пыли №1 за осенний период в природной среде

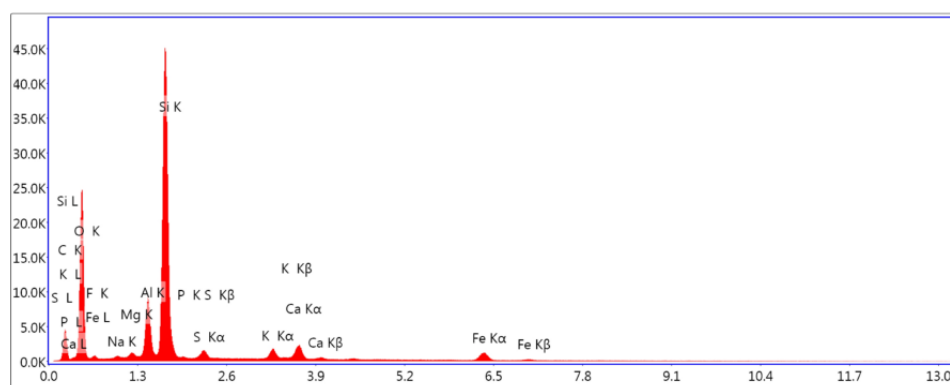


Рисунок 2.18 – Спектральный анализ образца пыли №2 за осенний период в природной среде

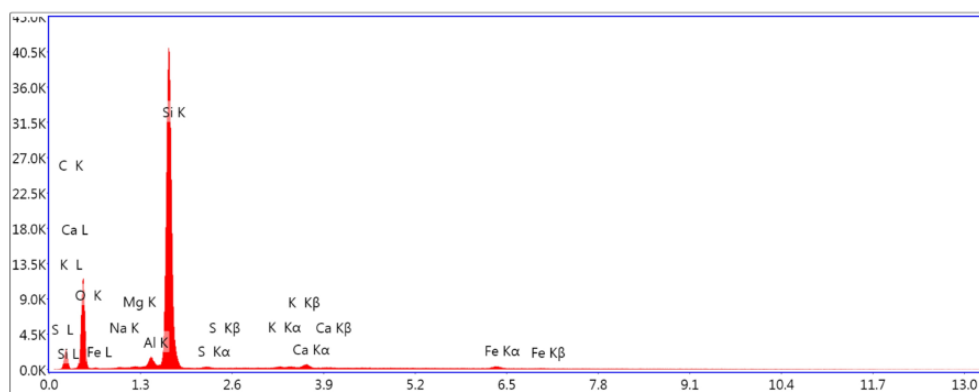


Рисунок 2.19 – Спектральный анализ образца пыли №3 за осенний период в природной среде

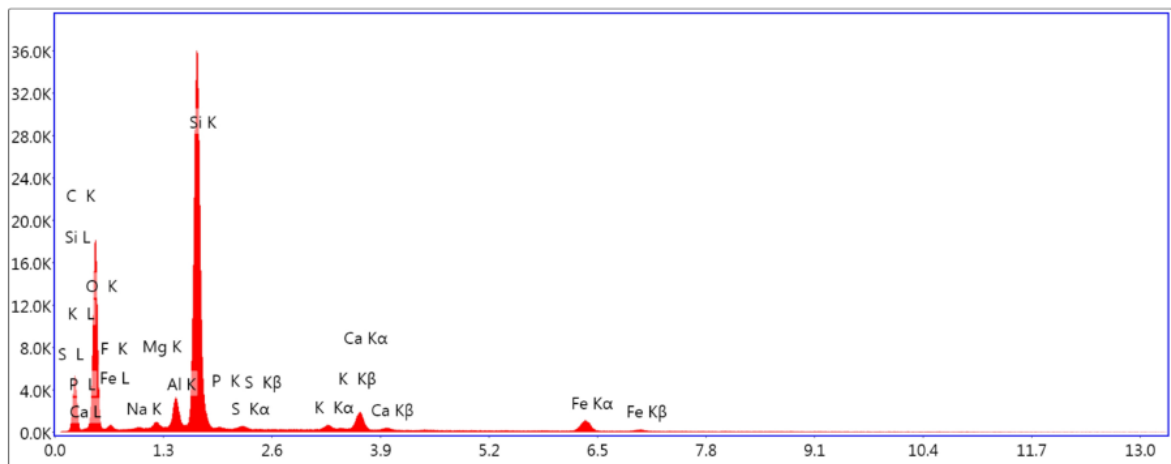


Рисунок 2.20 – Спектральный анализ образца пыли №4 за осенний период в природной среде

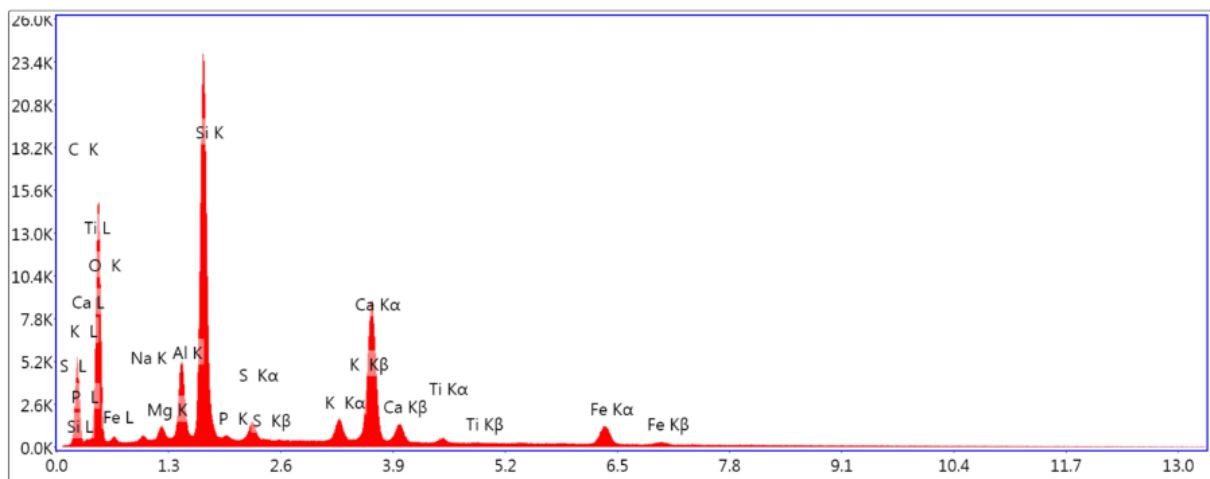


Рисунок 2.21 – Спектральный анализ образца пыли №5 за осенний период в природной среде

На рисунке 2.22 изображена микрофотография пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период. Элементный состав каждой из выделенных частиц изучен отдельно. На рисунке 2.23 представлен спектральный анализ выделенных на микрофотографии частиц. Результаты исследования представлены в таблице 2.7.

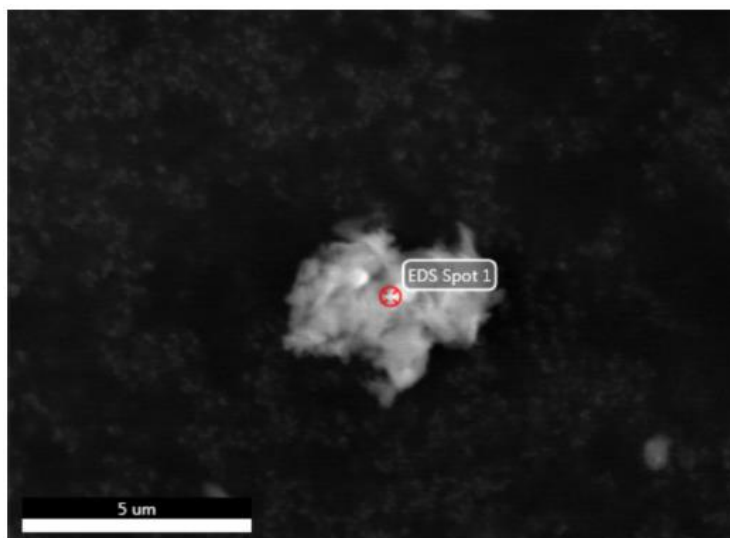


Рисунок 2.22 – Микрофотография пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период, 2016 г.

Таблица 2.7 – Элементный состав пыли с диаметром частиц менее 10 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в природной среде за осенний период, 2016 г.

Элемент	Весовая доля, %	Атомная доля, %	Погрешность, %
C	56.29	65.96	6.29
O	34.21	30.09	9.74
Na	0.34	0.21	12.81
Mg	0.23	0.13	10.33
Al	0.98	0.51	5.12
Si	1.95	0.98	3.49
P	0.38	0.17	6.32
S	0.33	0.14	6.93
K	0.26	0.09	8.9
Ca	4.43	1.55	1.9
Fe	0.6	0.15	8.51

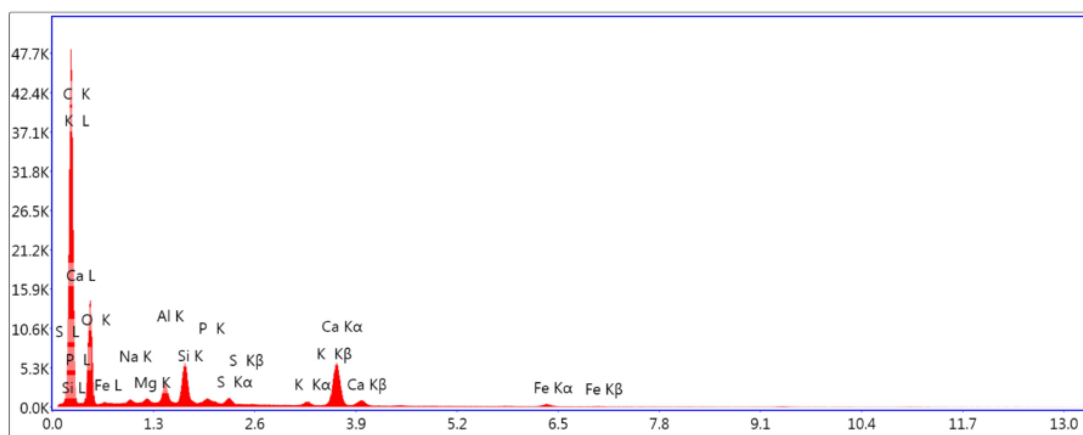


Рисунок 2.23 – Спектральный анализ образца пыли за осенний период в природной среде

На рисунке 2.24 изображена микрофотография пыли с диаметром частиц менее 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за летний период. На рисунке 2.25 представлен спектральный анализ выделенных на микрофотографии частиц. Результаты исследования представлены в таблице 2.8.

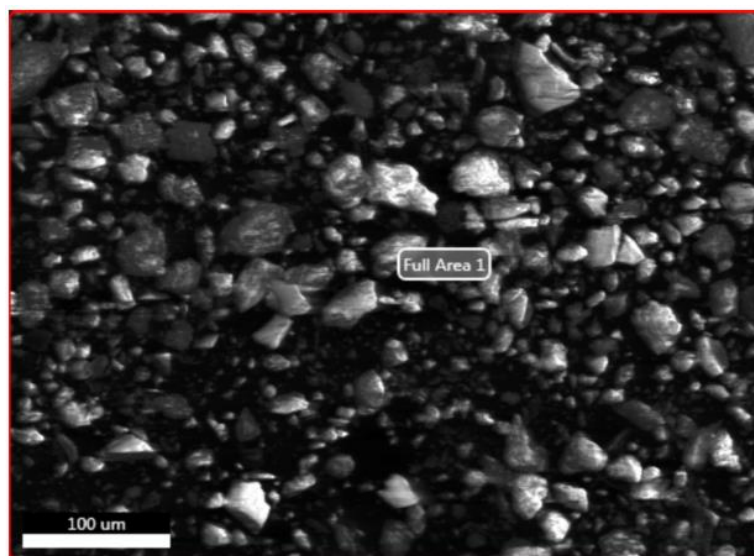


Рисунок 2.24 – Микрофотография пыли с диаметром частиц менее 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за летний период, 2016 г.

Таблица 2.8 – Элементный состав пыли с диаметром частиц менее 100 мкм, отобранной с вертикальной поверхности в городской среде за летний период, 2016 г.

Элемент	Весовая доля, %	Атомная доля, %	Погрешность, %
O	54.1	71.02	8.99
Na	0.83	0.76	13.88
Mg	0.74	0.64	10.27
Al	3.4	2.64	6.12
Si	17.94	13.41	4.2
S	0.44	0.29	11.76
K	1.11	0.59	7.53
Ca	17.38	9.11	1.96
Fe	4.06	1.53	4.08

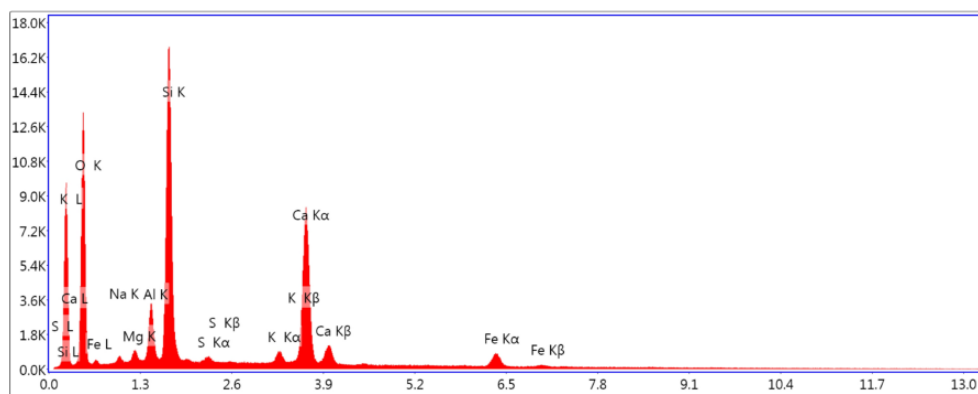


Рисунок 2.25 – Спектральный анализ образца пыли за летний период в природной среде

Анализ элементного состава образцов пыли, отобранной в городской и природной средах показывает, что основными компонентами образцов являются следующие вещества: C, O, Si, Ca, менее значительным было содержание таких веществ, как Na, Mg, Al, K, Fe, S. Таким образом, основными веществами, которые содержались в исследуемых пробах пыли, являются неметаллы, в то время как

содержание веществ, относящихся к металлам, было менее значительным. Доказано, что в обеих рассматриваемых дисперсных группах (более 100 мкм и менее 10 мкм) и на обеих пробоотборных площадках наблюдаются схожие элементные составы. Содержание данных веществ в городе выше, что может быть объяснено антропогенной окружающей средой.

### **2.3 Анализ свойств вертикальных поверхностей**

Здания, сооружения и памятники архитектуры, расположенные в городской среде, составляют фонд объектов культурного наследия, подлежащих защите. Они ежедневно подвергаются агрессивному воздействию загрязнений, содержащихся в атмосферном воздухе. Рассмотрим основные свойства и конструктивные особенности вертикальных поверхностей зданий и сооружений, влияющие на процесс адгезии пыли на вертикальные поверхности строительных конструкций. В зависимости от того, остается ли зазор между наружной стеной здания и отделочным материалом, фасады подразделяют на вентилируемые и невентилируемые. Вентилируемые фасады предполагают наличие вентиляционного зазора между фасадным материалом и стеной или утеплителем, если он используется. Зазор необходим для свободной циркуляции воздуха и отвода лишней влаги, которая конденсируется или выходит из объекта через стены. Материал перекрытия остается при этом полностью защищенным от атмосферных воздействий. Невентилируемый фасад предполагает монтаж отделочного материала непосредственно к наружной стене [43,44]. Для обустройства как вентилируемых, так и невентилируемых фасадов зданий и сооружений чаще всего используют следующие виды строительных и отделочных материалов: штукатурка (минеральная, акриловая, силикатная,

силиконовая), фасадная краска (акриловая, силиконовая, силикатная краски для наружных работ), природный и искусственный камень (мрамор, гранит, песчаник, доломит), отделочный кирпич (силикатный, керамический, клинкерный), фасадная плитка (керамическая, бетонная), фасадные кассеты (сталь, алюминий), керамогранит, стеклянные панели и др. Эксплуатационные характеристики лакокрасочных покрытий в значительной мере зависят от их взаимодействия с подложкой, то есть от типа возникающих связей между материалом пленки и подложкой. При нанесении лакокрасочного материала на твердую поверхность между ними устанавливается адсорбционное взаимодействие, степень которого определяет полноту смачивания поверхности, которая во многом определяет адгезию, сплошность, оптические, противокоррозионные и другие свойства покрытия. Ниже рассмотрены основные свойства вертикальных поверхностей зданий и сооружений [101]:

1. Чистота поверхности. Поверхность практически любых твердых тел содержит различные загрязнения (твердые частицы) и примеси (адсорбированные газы, влага воздуха). Для металлов (кроме золота, платины, серебра) типичные загрязнения – оксиды. Для всех металлов, содержащих оксидные слои, присуще вследствие сорбционной способности наличие физио- и хемосорбированной воды, количество которой достигает нескольких десятков монослоев в зависимости от адсорбционной активности металла и влажности воздуха. При нанесении на металлические поверхности лакокрасочный материал контактирует не с самим металлом, а с кислородными или иными соединениями и адсорбированной водой, находящимися на его поверхности. При изучении стеклянных поверхностей установлено, что они обогащены кремнезёмом и характерно наличие силанольных групп, являющихся донорами водорода, следовательно, как и в случае металлов, на поверхности стекол хемосорбируется вода. На поверхности силикатных строительных материалов (бетон, штукатурка, кирпич, камень) всегда присутствует адсорбированная вода, а также

карбонаты за счет диоксида углерода воздуха, т.к. строительные материалы имеют щелочной характер [43,44]. Известно, что адсорбированные на поверхности слои вещества могут изменять молекулярное взаимодействие. Несмотря на то, что адсорбционные слои не оказывают заметного влияния на электрические силы, возникающие за счет заряда двойного слоя, но в случае того, если данные слои сообщают поверхностную проводимость, возможно с течением времени контакта ожидать уменьшение кулоновского взаимодействия. Поверхностная влага способствует капиллярной конденсации в зазоре между контактирующими телами [52]. Существуют различные методы очистки поверхностей. Стекланные поверхности рекомендуют очищать хромовой смесью, а затем водой, или дистиллированной водой с ацетоном. Стальные поверхности очищают силикагелем, углем и бензином Б-70, активированным углем и этиловым спиртом, легированные хромованадиевые стальные поверхности предлагают очищать ацетоном. Финальной стадией очистки твердой поверхности является ее обработка органическим растворителем. Для особо тщательного удаления загрязнений используют метод очистки пламенем или в тлеющем газовом (атмосфера аргона) разряде, при этом методе происходит выгорание органических примесей. Окрашенные поверхности нельзя обрабатывать нагревом, растворителем, активированным углем, т.к. происходит растворение, размягчение, повреждение покрытия. С окрашенных поверхностей загрязнения удаляются с помощью дистиллированной воды [52].

2. Шероховатость поверхности. Микрорельеф или атомно-молекулярная шероховатость поверхности определяется кристаллической и надмолекулярной структурой самого материала. Кроме того, кристаллическим телам свойственны поверхностные трещины и полости микро- и субмикроскопических размеров. Макрорельеф поверхности обуславливается природой материала и условиями изготовления и обработки изделий. Разновидностями макрорельефа являются волнистость, шероховатость, пористость. Рельеф может создаваться за счет дефектов



поверхности – рисками, царапинами, раковинами. Данные о геометрии поверхности получают путем снятия профилограмм (совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности) [101]. Шероховатость поверхности определяют на основании ГОСТ 2789-73, используя высотные и шаговые параметры. Высотные параметры ( $R_a$  – среднеарифметическое отклонение,  $R_z$  – наибольшая высота профиля,  $R_{max}$  – полная высота профиля) характеризуют среднюю и наибольшую высоту неровностей, шаговые ( $S$  – средний шаг местных выступов профиля,  $S_m$  – средний шаг неровностей,  $t_p$  – относительная опорная длина профиля, где  $p$  – значение уровня сечения профиля) характеризуют взаимное расположение вершин неровностей. Определено 14 классов шероховатости (чистоты) поверхности. Высшим (наиболее чистым) классом является 14. Ему соответствуют поверхности со значениями  $R_a=0,01$  мкм и  $R_z=0,05$  мкм. Рельеф поверхности влияет на расход лакокрасочных материалов и во многом определяет необходимую толщину эксплуатационно–способных покрытий. Например, расходные коэффициенты красок при нанесении на древесину в 2-3 раза выше, чем при нанесении на металлы (непористые материалы). Толщина защитных покрытий должна превышать максимальную высоту микронеровностей поверхности не менее, чем на 20%. В связи с этим существует допустимый предел по шероховатости – приемлемой является поверхность не менее 4 класса чистоты ( $R_a=10$  мкм;  $R_z=40$  мкм). Норма шероховатости стали после дробеметной обработки составляет  $R_{max}= 55 - 85$  мкм. Необходимо иметь в виду, что уже при значениях  $R_{max} > 3$  мкм и  $R_a > 0,5$  мкм шероховатость поверхности подложки проявляется в покрытии и тем больше, чем тоньше пленка. Создание заданного рельефа и регулирование степени шероховатости поверхности осуществляется различными способами: механической, химической, термической, электрохимической обработкой и др. [101].

Шероховатость поверхности влияет, в частности, на адгезию частиц пыли к поверхностям. С этой целью Зимон А.Д. исследовал процесс адгезии гладких

сферических стеклянных частиц к шероховатой поверхности. В качестве шероховатой поверхности использовались стальные поверхности, обработанные по различным классам чистоты [52].

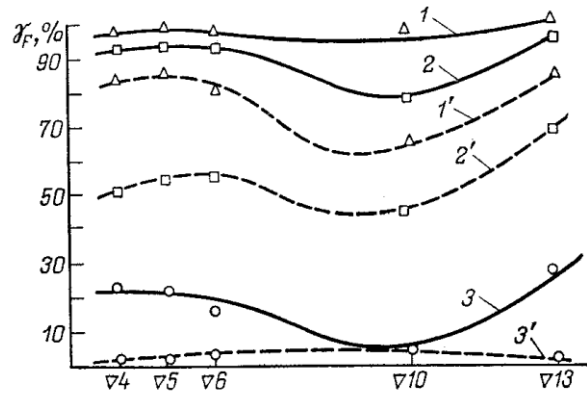


Рисунок 2.26 – Зависимость значений чисел адгезии стеклянных шарообразных частиц различных размеров (1,1' – 20 мкм, 2, 2' – 40 мкм, 3,3' – 70 мкм) к стальным поверхностям различной чистоты обработки поверхности при отрывающей силе 70 ед. г (1,2,3) и 1150 ед. г (1',2',3')

На рисунке 2.26 [52] показано изменение чисел адгезии в зависимости от класса чистоты обработки стальных поверхностей для стеклянных шарообразных частиц при различной отрывающей силе. Как видно из приведенных данных, числа адгезии, а, следовательно, и сама адгезия, достигают максимальных величин для стальных пластин, обработанных по 13 классу чистоты. С ухудшением качества обработки до 10 класса числа адгезии уменьшаются и затем снова растут. Шероховатость подложки практически не сказывается на числах адгезии малых частиц при небольшой силе отрыва (кривая 1, рисунок 2.26) и больших частиц (диаметром 70 мкм) при значительной силе отрыва (кривая 3', рисунок 2.26). В первом случае почти все частицы удерживаются на поверхности, во втором — почти все частицы удаляются. Таким образом, шероховатость поверхности не влияет на адгезию для двух крайних точек интегральных кривых сил адгезии [52].

На основании полученных данных можно выделить три случая, характеризующие влияние шероховатости поверхности на адгезию стеклянных шарообразных частиц на стальные поверхности. Первый случай возможен при условии, если контактирующие поверхности идеально гладкие, например, при адгезии стеклянных шарообразных частиц к оплавленной стеклянной поверхности или к металлическим поверхностям, обработанным по 13 классу чистоты. Второй случай возможен, когда высота выступов меньше размеров частиц. При этом площадь истинного контакта частиц с поверхностью уменьшается, и, следовательно, уменьшаются силы адгезии. В третьем случае увеличение сил адгезии происходит за счет шероховатости поверхности, когда величина выступов соизмерима с размерами частиц пыли [52]. Анализ данных исследований показал, адгезия на микрошероховатой поверхности меньше, чем на гладких или на поверхностях, обладающих макрошероховатостью [52]. Однако, данные исследования применимы исключительно для адгезии гладких сферических стеклянных частиц к стальной поверхности. Процесс адгезии атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий и сооружений изучен недостаточно.

Автором исследован процесс адгезии (налипания и отрыва) пыли на наиболее характерных для городской среды виды вертикальных поверхностях: стеклянной, металлической (стальной), оштукатуренной, окрашенной. Получим следующие варианты влияния шероховатости вертикальной поверхности на налипание ААГС:

1. При контакте ААГС со стеклянной вертикальной поверхностью, обработанной по высшему классу чистоты, т.е. с гладкой вертикальной поверхностью (рисунок 2.27а).
2. При контакте ААГС с металлической, оштукатуренной и окрашенной вертикальными поверхностями, обработанными не ниже 10 класса чистоты поверхности (рисунок 2.27б).

3. При контакте ААГС с металлической, оштукатуренной и окрашенной вертикальными поверхностями, обработанной ниже 10 класса чистоты поверхности (рисунок 2.27в).

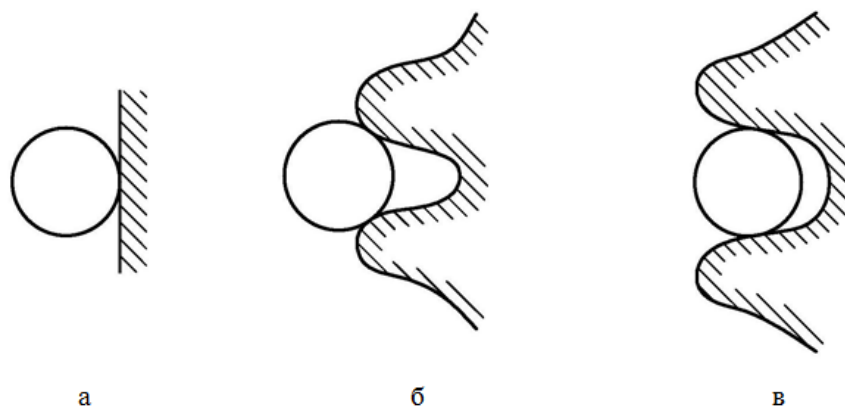


Рисунок 2.27 – Влияния шероховатости вертикальной поверхности на налипание ААГС: а – контакт с гладкой поверхностью, б – высота выступов поверхности меньше размеров частиц, в – высота выступов поверхности больше размеров частиц

3. Гидрофильность и гидрофобность поверхности – свойства, характеризующие сродство твердых тел к воде. По мнению Ребиндера П.А., металлы по своей молекулярной структуре гидрофобны, но оксиды и сорбированные газы придают их поверхности гидрофильность. К примеру, максимальное набухание древесины наблюдается в воде. С уменьшением диэлектрической проницаемости степень поглощения соответствующих жидкостей уменьшается. Однако, древесина практически не набухает в ароматических и алифатических углеводородах, происходит лишь капиллярное впитывание этих соединений [50].

Пластмассы в зависимости от химической природы связующего имеют разную по знаку полярности поверхность. Так, органическое стекло, полиамидные, полиацетатные пластические массы фено- и аминопласты хорошо смачиваются водными растворами пленкообразователей. Однако возникают проблемы при нанесении красок, содержащих полярные растворители, на полимеры с высокой

гидрофобностью поверхности, такие как полиолефины, полифторолефины. Таким образом, под водные краски нужна гидрофильная поверхность, а под краски на гидрофобных пленкообразователях – гидрофобная [50]. Регулирование по знаку полярности поверхности достигается следующими мероприятиями [50]:

- гидрофилизация – тщательным обезжириванием, окислением (в случае пластмасс), нанесением конверсионных покрытий (в случае металлов);
- гидрофобизация – обработкой поверхностей ПАВ, аппретами, шлифованием поверхности в присутствии неполярных жидкостей (для металлов).

## **2.4 Исследование климатических факторов**

Климатические факторы – это преобладающие для данной местности метеорологические условия, оказывающие влияние на организм человека, животных, растений. Рассмотрим основные из них, а именно температурный режим атмосферного воздуха, влажность атмосферного воздуха, атмосферное давление; скорость и направление ветра и др.

1. Температура атмосферного воздуха является одной из важнейших характеристик погоды и климата, оказывающая прямое воздействие на состояние человека, животных, растений, на работу механизмов и т.д. Она изменяется в течение времени, как с высотой, так и в горизонтальном направлении в широких пределах. Изменения температуры являются причиной колебания атмосферного давления. Более высокая температура в дневное время у поверхности земли способствует поднятию воздушных масс вверх и приводит к дополнительной турбулентности. В ночное время температура у поверхности земли снижается, следовательно, турбулентность, уменьшается. Способность поверхности земли

излучать или поглощать теплоту приводит к температурной инверсии. Увеличение температуры воздуха с высотой приводит к тому, что вредные выбросы не поднимаются выше определенного уровня. В инверсионных условиях ослабляется турбулентный обмен, условия рассеивания вредных выбросов в приземном слое атмосферы ухудшаются. На рисунке 2.28 [52] приведена зависимость числа адгезии от температуры окружающей среды.

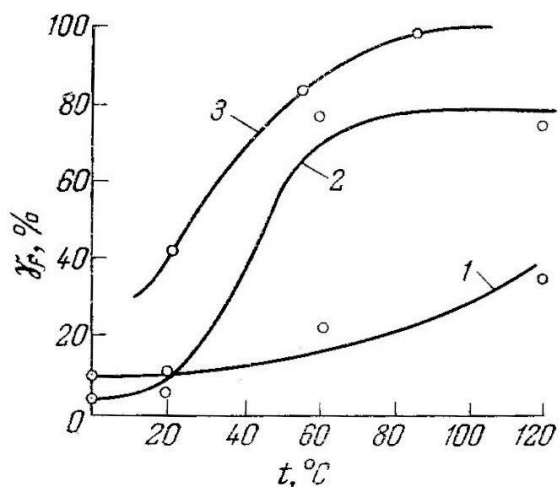


Рисунок 2.28 – Зависимость числа адгезии от температуры окружающей среды стеклянных частиц к следующим видам поверхностей: 1 – к стеклянной поверхности; 2,3 – к поверхности, окрашенной перхлорвиниловой эмалью

При отрыве частиц диаметром 30 мкм импульсным методом, когда весь процесс проводится при одинаковой температуре, получена кривая 3. Кривые 1,2 получены в результате определения адгезии методом центрифугирования. При импульсном методе влияние влажности воздуха исключено, следовательно, рост сил адгезии с увеличением температуры окружающей среды может быть объяснен происходящим изменением свойств контактирующих тел. Увеличение сил адгезии на окрашенных поверхностях (кривые 2,3, рисунок 2.28) можно объяснить появлением липкости покрытия, которая с ростом температуры увеличивается [52]. Опытным путем было установлено, что при помещении запыленного в воздушной среде (температура 20°C

и влажность воздуха 50–60%) образца в среду с низкой температурой (ниже  $0^{\circ}\text{C}$ ) силы адгезии резко возрастают из-за «примерзания» частиц к поверхности за счет конденсации влаги между контактирующими телами. Но в том случае, если само запыление поверхности провести при низкой температуре, силы адгезии не увеличатся [52].

2. Влажность воздуха – это содержание водяного пара в воздухе, характеризуется абсолютной влажностью, удельной влажностью, относительной влажностью, дефицитом влажности, точкой росы. Абсолютная влажность – это содержание в атмосфере водяного пара в граммах на  $1\text{ м}^3$  воздуха. Относительная влажность – это отношение фактической упругости водяного пара к упругости насыщения, выраженное в процентах. Относительная влажность характеризует степень насыщения воздуха водяным паром. [82].

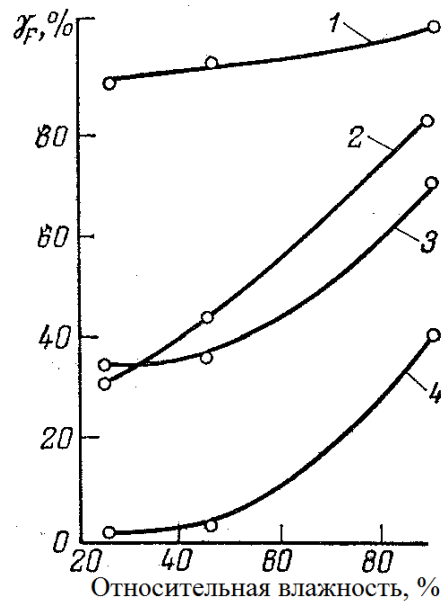


Рисунок 2.29 – Зависимость числа адгезии от влажности воздуха стеклянных шарообразных частиц диаметром  $70 \pm 2$  мкм к стеклянной поверхности:

1 – обычное стекло, 2 – гидрофобная подложка, 3 – гидрофобные частицы,

3 – гидрофобные частицы и подложка

На рисунке 2.29 [52] приведены экспериментальные значения чисел адгезии стеклянных шарообразных частиц к стеклянной пластине в зависимости от относительной влажности окружающего запыленную подложку воздуха. Как видно из рисунка 2.29, модификация, то есть метилирование диметилдихлорсиланом одной из контактирующих поверхностей приводит к уменьшению адгезии (кривые 2, 3, рисунок 2.29). Метилирование двух контактирующих поверхностей (кривая 4, рисунок 2.29) еще больше снижает силы адгезии [52].

3. Основным параметром, влияющим на распространение загрязняющих веществ в атмосфере, является ветер – это перемещение воздуха над поверхностью Земли в горизонтальном направлении. Ветер характеризуется скоростью, силой и направлением [82]. Наблюдается закономерность в том, что чем больше скорость ветра, тем больше турбулентность и, следовательно, быстрее происходит рассеивание атмосферных загрязнений. Важное значение по вопросам загрязнения атмосферы в зависимости от метеорологических факторов приобретают исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения [25]. Данные закономерности являются важной составляющей объективной оценки состояния воздушного бассейна и тенденций изменений загрязнения, а также дают возможность разработки мероприятий по обеспечению чистоты атмосферы [82].

Поскольку исследовании процесса адгезии (налипания и отрыва) частиц пыли на различных вертикальных поверхностях зданий и сооружений проводились в условиях г. Волгограда, на основании ранее проведенных исследований [5,8,9,46], а также данных автора можно утверждать, что для регионов с малой влажностью атмосферного воздуха, например, Волгоградской области, можно исключить в первом приближении из числа влияющих на процесс адгезии ААГС на вертикальные поверхности такие климатические факторы, как температура и влажность воздушной среды. Таким образом, в качестве исследуемых климатических факторов,



воздействующих на адгезию ААГС на вертикальные поверхности, в первом приближении были выбраны скорость и направление воздушного потока (ветра).

## **2.5 Режим ветра и особенности атмосферной циркуляции**

На процесс адгезии (налипания и отрыва) частиц атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на различных вертикальных поверхностях существенное влияние оказывают режим ветра и особенности атмосферной циркуляции. На основании справочных данных [22,26,42,61,71], в г. Волгограде в течение года доминирует широтная циркуляция атмосферы [5,8,9,46]. Для изучения закономерностей распределения ветров в г. Волгограде по 8 румбам за период 2015 – 2018 гг. приняты исходные данные, взятые из [79]. Розы ветров, построенные за этот период, подтвердили справочные данные о преобладании в г. Волгограде западных и восточных направлений ветра (Рисунок 2.30). Среднегодовая скорость ветра в г. Волгограде, согласно справочным данным, составляет 5,3 м/с, среднегодовые и сезонные характеристики ветра в г. Волгограде за период 2015–2018 гг. представлены в приложении Б.

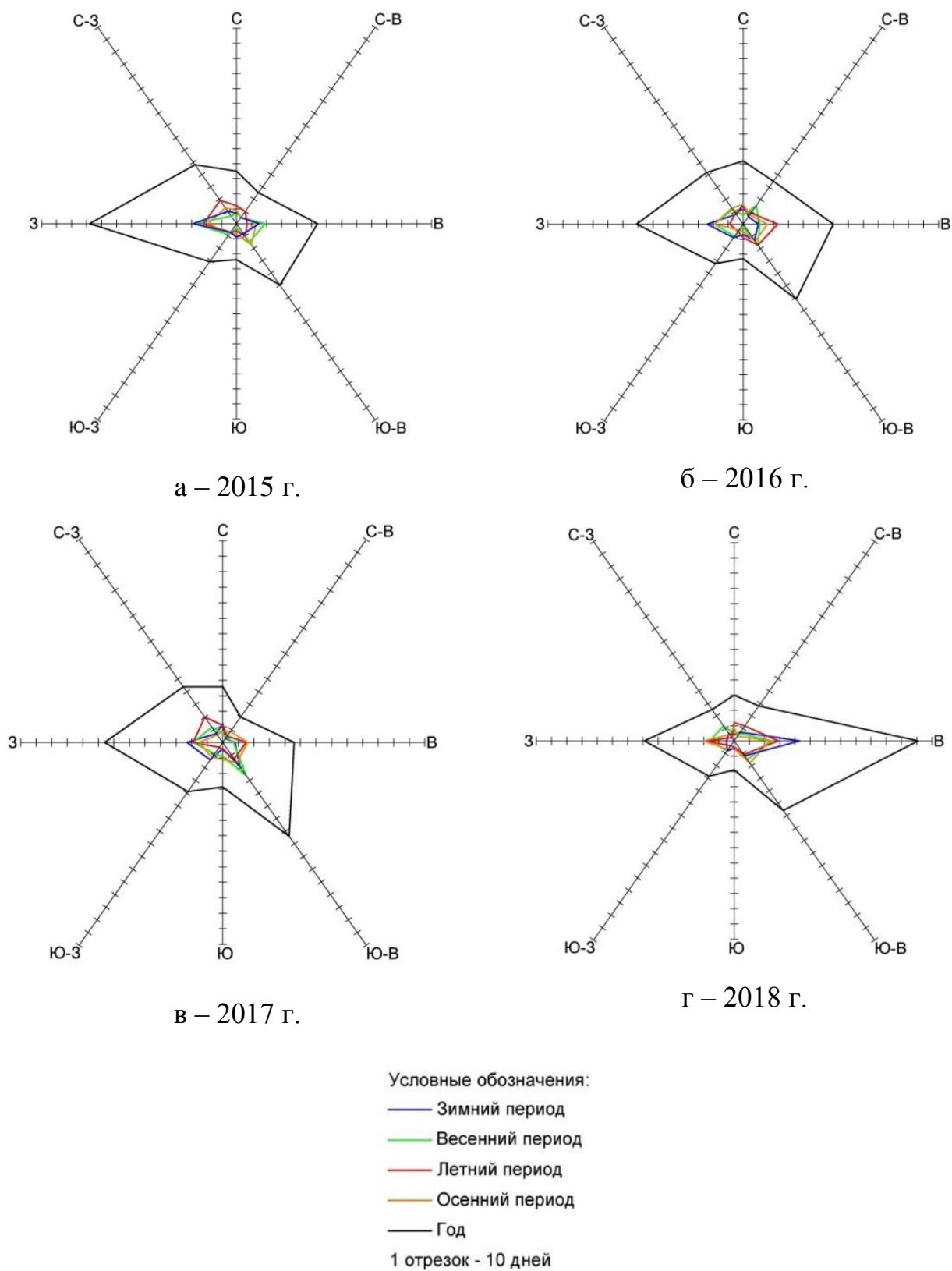


Рисунок 2.30 – Розы ветров для г. Волгограда: а–2015г., б–2016 г., в–2017 г., д–2018 г.

## 2.6 Исследование распределения повторяемости скоростей ветра

Так как корреляционный анализ данных, выполненный в ранее проведенных исследованиях [5,8,9,46], демонстрирует практическое отсутствие взаимосвязи между скоростью и направлением ветра в течение периода наблюдений, то установлено [5,8,9,34,46,64], что распределение скоростей ветра характеризуется двухпараметрическим уравнением Вейбулла [46]. Проверка подчинения повторяемостей скоростей ветра распределению Вейбулла в г. Волгограде за период 2010–2014 гг. была проведена в работе [46]. Автором осуществлена проверка подчинения повторяемостей скоростей ветра распределению Вейбулла в г. Волгограде за период 2015–2018 гг. (рисунок 2.31), а также, в частности, за зимний, весенний, летний, осенний периоды с 2015 по 2018 гг. (рисунок 2.32). Исходные данные аналогично взяты из [79] и представлены в таблице 2.9

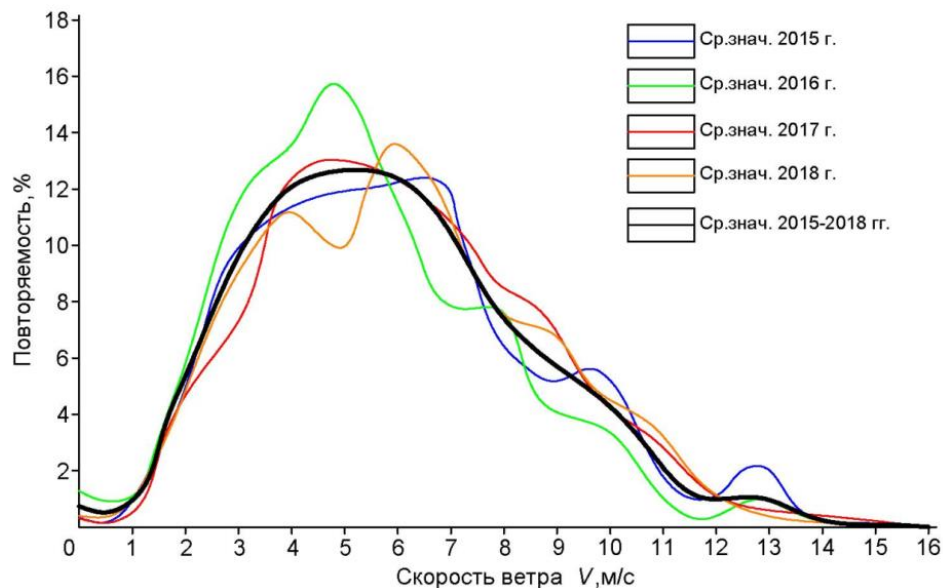


Рисунок 2.31 – Дифференциальные функции распределения повторяемости скоростей ветра за период 2015-2018 гг.

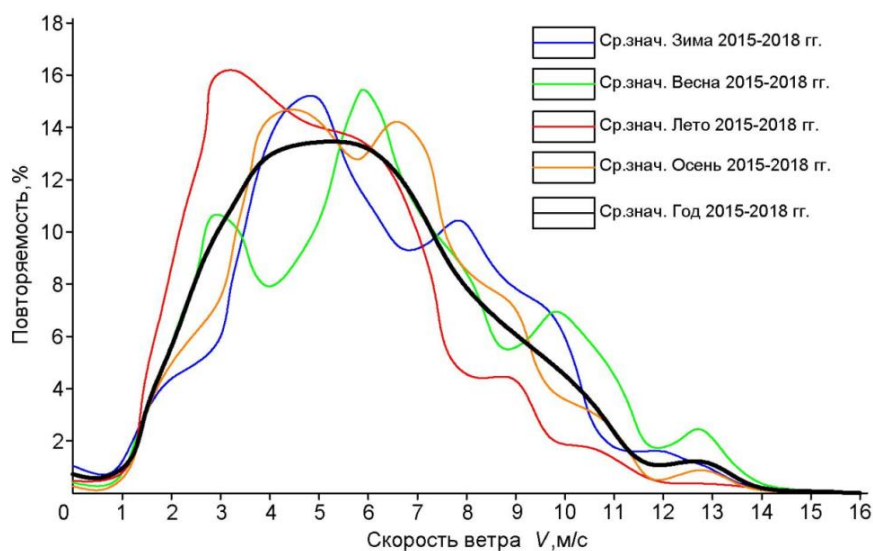


Рисунок 2.32 – Дифференциальные функции распределения повторяемости скоростей ветра за сезоны: зимний, весенний, летний, осенний периоды с 2015 по 2018 гг.

Таблица 2.9 – Повторяемость скоростей ветра за 2015–2018 гг.

Скорость ветра, м/с	Количество дней			
	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
0	1	5	1	3
1	3	5	2	4
2	22	24	19	21
3	42	48	30	37
4	47	57	51	47
5	50	66	55	42
6	50	50	52	57
7	50	34	47	48
8	29	32	37	33
9	22	18	31	29
10	23	15	18	20
11	11	6	13	15
12	4	1	6	6
13	9	4	2	2
14	1	1	0	0
15	1	0	0	1
16	0	0	1	0

## 2.7 Выводы по главе 2

1. При исследовании процесса адгезии по числу адгезии, введённому в использование Зимоном А.Д., используют логарифмически–нормальный закон распределения дисперсного состава пыли, предложенный Колмогоровым А.Н. Однако, пыль в воздухе городской среды в большинстве случаев подчиняется усечённому логарифмически–нормальному закону распределения.

2. Так как дисперсный состав городского атмосферного аэрозоля не подчиняется логарифмически–нормальному закону распределения, использованному Зимоном А.Д. для характеристики процесса адгезии стеклянной пыли по числу адгезии, то применение зависимостей для расчёта числа адгезии ААГС требует проведения экспериментальных исследований. Поэтому уместно говорить не о числе частиц и доле числа частиц, а об их массе и доле массы. По аналогии с Зимоном А.Д. будем понимать под числом адгезии массовую долю от налипших ранее частиц, которые остались на поверхности после воздействия на неё воздушного потока.

3. Анализ ранее проведенных исследований и данные автора позволяют утверждать, что для регионов с малой влажностью атмосферного воздуха, например, Волгоградской области, можно исключить в первом приближении из числа влияющих на процесс адгезии ААГС на вертикальных поверхностях зданий такие климатические факторы, как температура и влажность воздушной среды.

## **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

### **3.1 Описание экспериментальной установки**

С целью изучения закономерностей загрязнения зданий и сооружений были проведены экспериментальные исследования процесса адгезии (налипания и отрыва) частиц атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на различных вертикальных поверхностях. Данные исследования проводились в лаборатории кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» ИАиС ВолгГТУ. Автором разработана установка для запыления вертикальной пластины, которая относится к области измерительной техники и может быть использована при лабораторных и натурных исследованиях по оценке степени загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений пылью (рисунки 3.1–3.3).



Рисунок 3.1 – Установка для запыления вертикальной пластины в работе

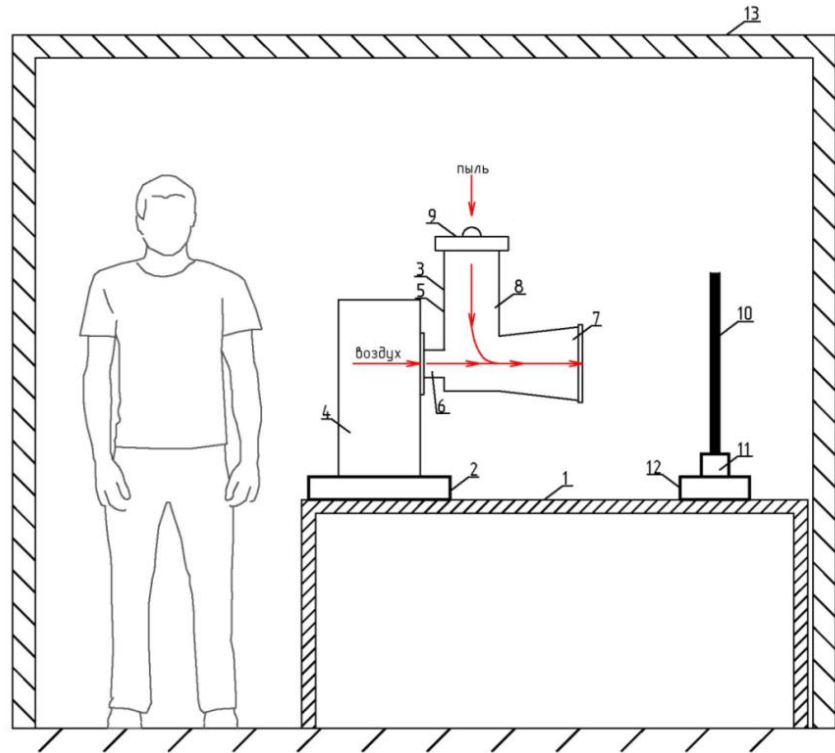


Рисунок 3.2 – Чертёж установки для запыления вертикальной пластины

Данная установка работает следующим образом. На неподвижно закреплённой подставке 1 установлена с возможностью поворота в горизонтальной плоскости платформа 2, на которой неподвижно смонтировано устройство 3 для запыления пластины, содержащее компрессор 4, создающий воздушный поток, с возможностью регулирования скорости подачи воздушного потока в пылевоздушную камеру 5, неподвижно смонтированную на компрессоре 4, содержащую патрубок 6 поступающего из компрессора 4 воздушного потока, диффузор 7, расположенный соосно с патрубком 6 поступающего из компрессора воздуха и установленный под прямым углом на диффузоре 7 патрубок 8 снабженный крышкой 9 и предназначенный для подачи в пылевоздушную камеру 5 исследуемой навески пыли. Кроме этого на подставке 1 размещена пробоотборная прямоугольная пластина 10 вертикально закрепленная на стойке 11 с основанием 12 с возможностью

перемещения пробоотборной пластины 10 при изменении расстояния, обусловленного заданным режимом исследования, от диффузора 7.

Пробоотборная пластина 10 может быть выполнена из различных строительных и отделочных материалов. В данной работе исследованы следующие варианты вертикальных поверхностей:

1. Стеклопанная поверхность, обработанная по высшему классу чистоты, т.е. гладкая поверхность.
2. Металлическая (стальная) поверхность, обработанная не ниже 10 класса чистоты поверхности.
3. Оштукатуренная поверхность, обработанная ниже 10 класса чистоты поверхности.
4. Окрашенная поверхность, обработанная ниже 10 класса чистоты поверхности.



Рисунок 3.3 – Установка для запыления вертикальной пластины, расположенная в «чистой комнате», выполняющей роль ограждающей пылезащитной конструкции

Помимо этого установка для запыления вертикальной пробоотборной пластины снабжена пылезащитной конструкцией 13, представляющую собой макет «чистой комнаты», который имеет прямоугольную форму и выполнен из пропускающего свет материала. Пылезащитная конструкция 13 препятствует распространению пыли



в окружающее пространство. Работа компрессора осуществляется от электрической сети (на чертеже не показано). Согласно [37], рекомендуется использование индивидуальных средств защиты от пыли, например, фильтрующих противопылевых респираторов при значениях концентрации пыли выше гигиенических норм. На данную экспериментальную установку оформлена заявка на получение патента на изобретение РФ № 2019103450 от 07.02.2019.

### 3.2 Анализ исследуемых образцов ААГС

В качестве исследуемых ААГС использовались образцы, отобранные с вертикальных поверхностей зданий, расположенных в городской среде. Для экспериментальных исследований образцы пыли были разделены по размеру на следующие группы микроскопическим методом:

1. Частицы ААГС с максимальным диаметром до 30 мкм (рисунок 3.4).
2. Частицы ААГС с максимальным диаметром до 20 мкм (рисунок 3.5).
3. Частицы ААГС с максимальным диаметром до 10 мкм (рисунок 3.6).

На рисунке 3.4 представлена микрофотография пробы ААГС, обработанная в программном комплексе «Dust-1», и построенная по ее данным интегральная функция распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке. Анализ данной кривой показал следующие характеристики:  $D_{\max}=30$  мкм,  $D_{50}=15$  мкм,  $D(PM_{10})=18$  %,  $D(PM_{2.5})=0,2$  %.

На рисунке 3.5 представлена микрофотография пробы ААГС, обработанная в программном комплексе «Dust-1», и построенная по ее данным интегральная функция распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-

логарифмической сетке. Анализ данной кривой показал следующие характеристики:  $D_{\max}=20$  мкм,  $D_{50}=10$  мкм,  $D(PM_{10})=55$  %,  $D(PM_{2.5})=0,3$  %.

На рисунке 3.6 представлена микрофотография пробы ААГС, обработанная в программном комплексе «Dust-1», и построенная по ее данным интегральная функция распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке. Анализ данной кривой показал следующие характеристики:  $D_{\max}=10$  мкм,  $D_{50}=5$  мкм,  $D(PM_{10})=100$  %,  $D(PM_{2.5})=2$  %.

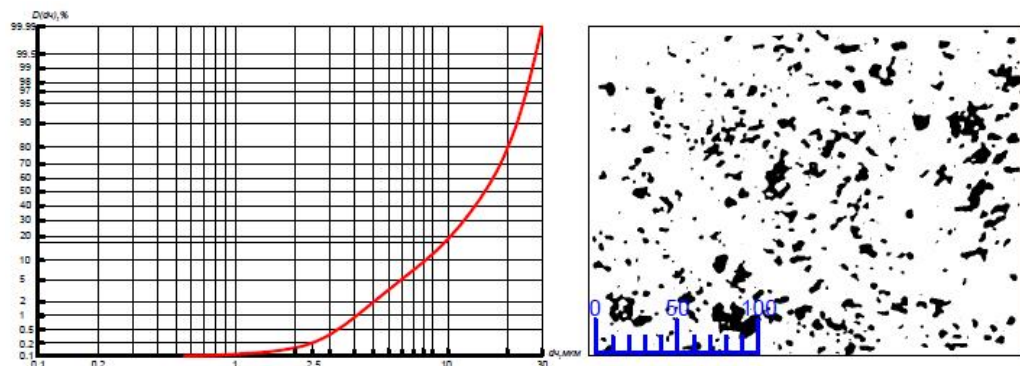


Рисунок 3.4 – Микрофотография ААГС и соответствующая ей интегральная функция распределения частиц по эквивалентным диаметрам с размером частиц до 30 мкм

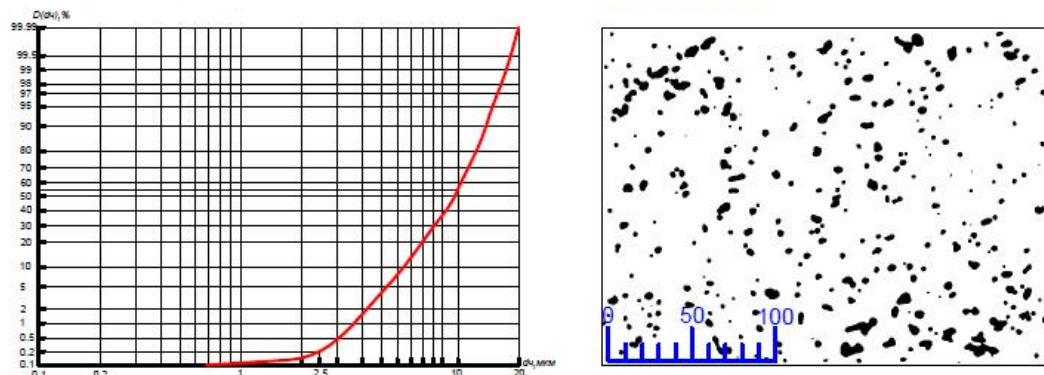


Рисунок 3.5 – Микрофотография ААГС и соответствующая ей интегральная функция распределения частиц по эквивалентным диаметрам с размером частиц до 20 мкм

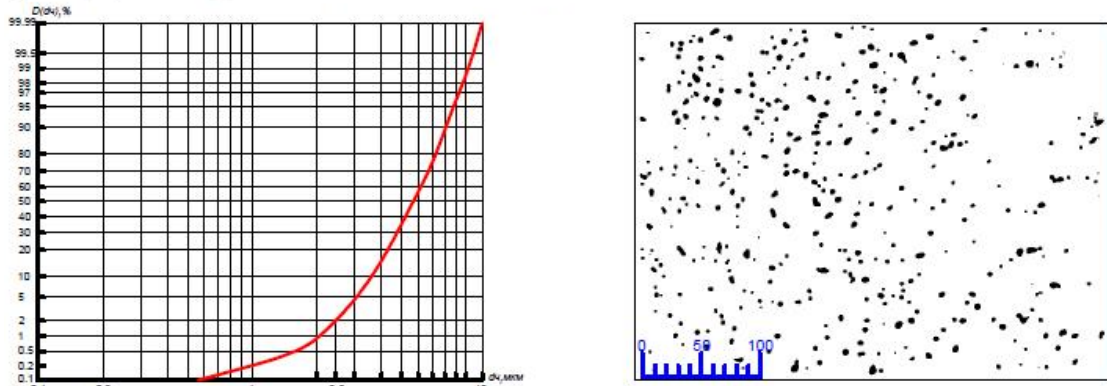


Рисунок 3.6 – Микрофотография ААГС и соответствующая ей интегральная функция распределения частиц по эквивалентным диаметрам с размером частиц до 10 мкм

### 3.3 Методика проведения экспериментальных исследований налипания ААГС на вертикальные поверхности

При проведении исследований налипания ААГС на вертикальные поверхности методами планирования эксперимента [2,17,59,81] в качестве функции отклика была выбрана массовая доля налипших частиц городской пыли к пыли в набегающем на вертикальную поверхность воздушном потоке –  $\gamma_F$  (массовая доля) (п. 2.1). В качестве варьируемых факторов, влияющих на функцию отклика, были выбраны следующие факторы:

1.  $C$  – концентрация пыли в воздушном потоке,  $\text{мг/м}^3$ .
2.  $d_{\text{max}}$  – максимальный размер частиц, мкм.
3.  $V$  – скорость воздушного потока, м/с.
4.  $\varphi$  – косинус угла воздушного потока к вертикальной поверхности.

Варьируемые факторы были приведены в соответствии с [2,17,58,59,81] к виду:

$$X_1 = \frac{C - C_0}{\Delta C}; X_2 = \frac{d_{max} - d_{max0}}{\Delta d_{max}}; X_3 = \frac{V - V_0}{\Delta V}; X_4 = \frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta \varphi} \quad (3.1)$$

где  $C_0, d_{max0}, V_0, \varphi_0$  – значения соответствующих факторов в центре плана;  
 $\Delta C, \Delta d_{max}, \Delta V, \Delta \varphi$  – уровни изменения значений факторов.

Таблица 3.1 – Исходные данные для планирования эксперимента

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
Концентрация пыли в воздушном потоке $C, \text{мг/м}^3$	0.5	0.5	1	1.5
Максимальный размер частиц $d_{max}, \text{мкм}$	10	10	20	30
Скорость воздушного потока $V, \text{м/с}$	2.5	1	3.5	6
Косинус угла $\alpha$ воздушного потока к вертикальной поверхности, $\varphi$	0.3536	0.7071	0.3536	0

План эксперимента представляет собой матрицу планирования, которая соответствует центральному композиционному рототабельному плану (ЦКРП). В основе она имеет план полного факторного эксперимента –  $2^4$  (ядро матрицы планирования), а также дополняется точками факторного пространства, а именно звездными точками и опытами в центре плана. Для данного случая  $n$  (количество факторов) равно 4, звездное плечо –  $\alpha$  равно  $\pm 2$ , количество опытов ядра матрицы  $2^4 = 16$ , число звездных точек  $N_\alpha$  равно 8, число нулевых точек  $N_0$  равно 8. Таким образом, матрица рототабельного плана второго порядка состоит из 32 опытов (таблица 3.2) [2,17,58,59,81].

Таблица 3.2 – План эксперимента

№ опыта	$X_0$	План			
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	-1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	+1	-1
10	+1	-1	+1	+1	-1
11	+1	+1	-1	+1	-1
12	+1	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	+1	-1	-1
14	+1	-1	+1	-1	-1
15	+1	+1	-1	-1	-1
16	+1	-1	-1	-1	-1
17	+1	+2,0	0	0	0
18	+1	-2,0	0	0	0
19	+1	0	+2,0	0	0
20	+1	0	-2,0	0	0
21	+1	0	0	+2,0	0
22	+1	0	0	-2,0	0
23	+1	0	0	0	+2,0
24	+1	0	0	0	-2,0
25	+1	0	0	0	0
26	+1	0	0	0	0
27	+1	0	0	0	0
28	+1	0	0	0	0
29	+1	0	0	0	0
30	+1	0	0	0	0
31	+1	0	0	0	0
32	+1	0	0	0	0

Уравнение регрессии отыскивалось в виде полинома второй степени относительно четырех факторов:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad (3.2)$$

Обработка экспериментальных данных была проведена при помощи ППП «STATISTICA» [28,29]. Значимость вычисленных коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента. Для оценки адекватности полученных регрессионных зависимостей использован критерий Фишера с учетом выполнения условия, что расчетное значение  $F_p$  меньше табличного  $F_t$ . Оценка воспроизводимости полученных результатов проводилась при помощи критерия Кохрена [2,17,58,59,81].

### **3.4 Анализ результатов экспериментальных исследований налипания ААГС на различные вертикальные поверхности**

Проведенные экспериментальные исследования налипания ААГС на вертикальные поверхности позволили получить значения массовой доли налипших частиц городской пыли к пыли в набегающем на вертикальную поверхность воздушном потоке. Оценка значимости коэффициентов регрессии  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$  производилась по критерию Стьюдента для уровня значимости  $q=0,5$  при принятой для технических экспериментов доверительной вероятности  $P=0,95$ . Адекватность уравнений регрессии проверялась сопоставлением расчетного и табличного (при заданных  $q$  и числе степеней свободы) значений критерия Фишера  $F$ , представляющего собой отношение дисперсии

адекватности к ошибке опыта. Выполнение во всех случаях условия  $F_{кр} < F$  свидетельствует об адекватности полученной нелинейной модели. Также была использована пошаговая квадратичная регрессия с включением предикатов. Уровень значимости во всех расчетах  $\alpha = 0,05$  [23,58]. Результаты экспериментальных исследований аппроксимированы полиномом второй степени (3.2). В качестве вертикальных поверхностей рассмотрены такие образцы, как металлическая (стальная), оштукатуренная, окрашенная, стеклянная поверхности.

1. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **стеклянная поверхность**. Под стеклянной поверхностью в работе понимается поверхность, обработанная по высшему классу чистоты, т.е. гладкая вертикальная поверхность. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})_{ст.}} = 0,003455 + 0,001045X_1 + 0,001004X_2 + \\ + 0,002174X_3 + 0,001945X_4 + 0,000998X_1^2 + 0,000998X_2^2 \quad (3.3)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F=20,99$ ,  $F_{кр} = 7,23$ , так как  $F > F_{кр}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты значимы.

2. Исследуемые образцы вертикальной поверхности – **оштукатуренная и окрашенная поверхности**. Под оштукатуренной поверхностью в работе понимается вертикальная поверхность, отделанная минеральной штукатуркой и соответствующая 10 классу чистоты поверхности или ниже. Под окрашенной поверхностью в работе принимается вертикальная поверхность, окрашенная перхлорвиниловой краской и соответствующая 10 классу чистоты поверхности или ниже. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})_{шт.}} = 0,006182 + 0,001216X_1 + 0,001104X_2 + 0,002786X_3 + 0,002357X_4 \quad (3.4)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F=18,98$ ,  $F_{кр} = 7,23$ , так как  $F > F_{кр}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты значимы.

3. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **металлическая (стальная) поверхность**. Под металлической (стальной) поверхностью в работе принимается вертикальная поверхность, обработанная в соответствии с 10 классом чистоты поверхности или ниже. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned} \gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{мет.}}} = & 0,003679 + 0,0009746X_1 + 0,001104X_2 + \\ & + 0,001945X_3 + 0,001974X_4 + 0,000882X_2^2 + 0,000687X_3 \cdot X_4 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F = 19,55$ ,  $F_{кр} = 7,23$ , так как  $F > F_{кр}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты значимы.

Подставляем вместо переменных  $X_1, X_2, X_3, X_4$  их значения, а именно  $X_1 = 2C - 2$ ;  $X_2 = 0,1d - 2$ ;  $X_3 = 0,4V - 1,4$ ;  $X_4 = 2,828\varphi - 1$ . Получим следующие уравнения регрессии:

1. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **стеклянная поверхность**:

$$\begin{aligned} \gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{ст.}}} = & 0,00235 - 0,00589C - 0,0002988d + \\ & + 0,00087V + 0,0055\varphi + 0,003992C^2 + 0,00000998d^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

2. Исследуемые образцы вертикальной поверхности – **оштукатуренная и окрашенная поверхности**:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{шт.}}} = -0,00472 + 0,002432C + 0,0001104d + 0,001114V + 0,006667\varphi \quad (3.7)$$

3. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **металлическая (стальная) поверхность**:

$$\begin{aligned} \gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{мет.}}} = & -0,002737 + 0,00195C - 0,00024d + \\ & + 0,0005V - 0,000319\varphi + 0,000009d^2 + 0,00078V \cdot \varphi + 0,0001589d \cdot \varphi \end{aligned} \quad (3.8)$$



### 3.5 Методика проведения экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей

Механизм загрязнения зданий пылью складывается из таких составляющих, как «налипание» – это процесс взаимодействия частиц с твердой поверхностью [52], и «отрыв» – это процесс, при котором направление воздушного потока преимущественно удаляет находящиеся на вертикальной поверхности частицы, не позволяя им осесть на поверхности [18]. Для удобства обозначим диапазон изменения направления воздушного потока при налипании частиц «положительным», а при отрыве частиц – «отрицательным». Процесс загрязнения вертикальных поверхностей за счет налипания пыли был описан в пп. 3.3–3.4. В данном разделе рассмотрим закономерности отрыва городской пыли с вертикальных поверхностей. При проведении экспериментальных исследований по отрыву частиц городской пыли с вертикальных поверхностей методами планирования эксперимента [2,17,59,81] в качестве функции отклика была выбрана массовая доля частиц городской пыли, которые отрываются с вертикальной поверхности, под действием ветра в единицу времени –  $\gamma A_{отр}$ , 1/с (п. 2.1). В качестве варьируемых факторов, влияющих на функцию отклика, были выбраны следующие факторы:

1.  $G$  – величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальной поверхности,  $\text{мг/м}^2$ . Данный термин активно используется в печатной промышленности и обозначает толщину бумажного листа, т.е. массу листа с размерами  $1\text{м} \times 1\text{м}$ . В данной работе исследуется масса налипшей на вертикальные поверхности пыли, собранная с заданной площади вертикальной поверхности.

2.  $V$  – скорость воздушного потока к вертикальной поверхности,  $\text{м/с}$ .

3.  $\varphi$  – косинус угла воздушного потока к вертикальной поверхности.

Варьируемые факторы были приведены в соответствии с [2,17,58,59,81] к виду:

$$X_1 = \frac{G - G_0}{\Delta G}; X_2 = \frac{V - V_0}{\Delta V}; X_3 = \frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta \varphi} \quad (3.9)$$

где  $G_0, V_0, \varphi_0$  – значения соответствующих факторов в центре плана;

$\Delta G, \Delta V, \Delta \varphi$  – уровни изменения значений факторов.

Исходные данные для планирования эксперимента приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Исходные данные для планирования эксперимента

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
Плотность налипания пыли на вертикальной поверхности $G, \text{мг/м}^2$	20	3	23	43
Скорость воздушного потока $V, \text{м/с}$	2.5	1	3.5	6
Косинус угла $\alpha$ воздушного потока к вертикальной поверхности, $\varphi$	0.3536	0.9397	0.9848	1

План эксперимента – матрица планирования, которая соответствует ЦКРП. В основе она имеет план полного факторного эксперимента –  $2^3$  (ядро матрицы планирования), а также дополняется определенными точками факторного пространства, а именно звездными точками и опытами в центре плана. Для данного случая  $n$  (количество факторов) равно 3, звездное плечо равно  $\alpha$  равно  $\pm 1,682$ , количество опытов ядра матрицы  $2^3 = 8$ , число звездных точек  $N_\alpha$  равно 6, число нулевых точек  $N_0$  равно 6. Таким образом, матрица рототабельного плана второго порядка состоит из 20 опытов (таблица 3.4) [2,17,58,59,81].

Таблица 3.4 – План эксперимента

№ опыта	X <sub>0</sub>	План		
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1
4	+1	-1	-1	+1
5	+1	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	+1	+1	-1	-1
8	+1	-1	-1	-1
9	+1	+1,682	+1	+1
10	+1	-1,682	+1	+1
11	+1	0	+1,682	+1
12	+1	0	-1,682	+1
13	+1	0	0	+1,682
14	+1	0	0	-1,682
15	+1	0	0	0
16	+1	0	0	0
17	+1	0	0	0
18	+1	0	0	0
19	+1	0	0	0
20	+1	0	0	0

Уравнение регрессии также отыскивалось в виде полинома второй степени относительно трех факторов:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (3.10)$$

Обработка экспериментальных данных была проведена при ППП «STATISTICA» [28,29]. Значимость вычисленных коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента. Для оценки адекватности полученных регрессионных зависимостей использован критерий Фишера с учетом выполнения условия, что

расчетное значение  $F_p$  меньше табличного  $F_t$ . Оценка воспроизводимости полученных результатов проводилась при помощи критерия Кохрена [2,17,59,81].

### **3.6 Анализ результатов экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей**

Проведенные экспериментальные исследования отрыва городской пыли с вертикальных поверхностей позволили получить значения массовой доли частиц городской пыли, которые отрываются с вертикальной поверхности, под действием ветра в единицу времени для различных вертикальных поверхностей. Оценка значимости коэффициентов регрессии  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ , производилась по критерию Стьюдента для уровня значимости  $q=0,5$  при принятой для технических экспериментов доверительной вероятности  $P=0,95$ . Адекватность уравнений регрессии проверялась сопоставлением расчетного и табличного (при заданных  $q$  и числе степеней свободы) значений критерия Фишера  $F$ , представляющего собой отношение дисперсии адекватности к ошибке опыта. Выполнение во всех случаях условия  $F_{кр} < F$  свидетельствует об адекватности полученной нелинейной модели. Также была использована пошаговая квадратичная регрессия с включением предикатов. Уровень значимости во всех расчетах  $\alpha = 0,05$  [23].

Результаты экспериментальных исследований аппроксимированы полиномом второй степени (3.7). В качестве исследуемых вертикальных поверхностей также рассмотрены такие образцы, как металлическая (стальная), стеклянная, оштукатуренная и стеклянная поверхности.

1. Исследуемые образцы вертикальной поверхности – **оштукатуренная и окрашенная поверхности**. Под оштукатуренной поверхностью в работе принимается вертикальная поверхность, отделанная минеральной штукатуркой и соответствующая 10 классу чистоты поверхности или ниже. Под окрашенной поверхностью в работе принимается вертикальная поверхность, окрашенная перхлорвиниловой краской и соответствующая 10 классу чистоты поверхности или ниже. Таким образом, уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\gamma A_{\text{ошт.ум.}} = -0,99312 + 0,005084X_1 + 0,000019X_2 + 0,002330X_1 \cdot X_3 - 0,000996X_2 \cdot X_3 \quad (3.11)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F=82,31$ ,  $F_{\text{кр}} = 5,14$ , так как  $F > F_{\text{кр}}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что коэффициенты значимы.

2. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **стеклянная поверхность**. Под стеклянной поверхностью в работе принимается поверхность, обработанная по высшему классу чистоты, т.е. гладкая вертикальная поверхность. Таким образом, уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\gamma A_{\text{ст.см.}} = -0,99322 + 0,007003X_1 + 0,000012X_2 + 0,002005X_1^2 + 0,000470X_3^2 \quad (3.12)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F = 219,63$ ,  $F_{\text{кр}} = 5,14$ , так как  $F > F_{\text{кр}}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что коэффициенты значимы.

3. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **металлическая (стальная) поверхность**. Под металлической (стальной) поверхностью в работе принимается вертикальная поверхность, обработанная в соответствии с 10 классом чистоты поверхности или ниже. Таким образом, уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\gamma A_{\text{ошт.мет.}} = -0,9927 + 0,007202X_1 + 0,001975X_1^2 \quad (3.13)$$

Проверка значимости уравнения регрессии:  $F = 19,55$ ,  $F_{\text{кр}} = 6,12$ , так как  $F > F_{\text{кр}}$ , то уравнение регрессии значимо. Проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ - критерию Стьюдента показала, что коэффициенты значимы.

Подставляем вместо переменных  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  их значения, а именно  $X_1 = 0,05G - 1,15$ ;  $X_2 = 0,4V - 1,4$ ;  $X_3 = 2,828\varphi - 2,785$ . Получим следующие уравнения регрессии:

1. Исследуемые образцы вертикальной поверхности – **оштукатуренная и окрашенная поверхности**:

$$\gamma A_{\text{отр.шт.}} = -0,99527 - 0,00007G + 0,00108V - 0,00378\varphi + 0,00033G \cdot \varphi - 0,001086V \cdot \varphi \quad (3.14)$$

2. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **стеклянная поверхность**:

$$\gamma A_{\text{отр.ст.}} = -0,99499 + 0,00012G + 0,000005V - 0,0074\varphi + 0,000005G^2 + 0,00376\varphi^2 \quad (3.15)$$

3. Исследуемый образец вертикальной поверхности – **металлическая (стальная) поверхность**:

$$\gamma A_{\text{отр.мет.}} = -0,99837 + 0,00013G + 0,000005G^2 \quad (3.16)$$

### 3.7 Анализ процессов адгезии (налипания и отрыва) ААГС на вертикальных поверхностях

В результате проведенных экспериментальных исследований доказано, что наибольшее влияние на процессы адгезии (налипания и отрыва) ААГС на вертикальных поверхностях оказывают такие климатические факторы, как скорость и направление воздушного потока. Установлено, что налипание пыли осуществляется в «зоне устойчивого налипания» при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $30^\circ \div 150^\circ$ . Максимальные значения налипания наблюдаются при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности под углом  $90^\circ$  (рисунок 3.7).

Процесс отрыва частиц с вертикальных поверхностей осуществляется в «зонах устойчивого отрыва» при направлениях воздушного потока к вертикальной

поверхности в диапазоне  $0\div 20^\circ$  и  $160^\circ\div 180^\circ$ . Максимальный отрыв частиц городской пыли – при направлении воздушного потока вдоль вертикальной поверхности (рисунок 3.7).

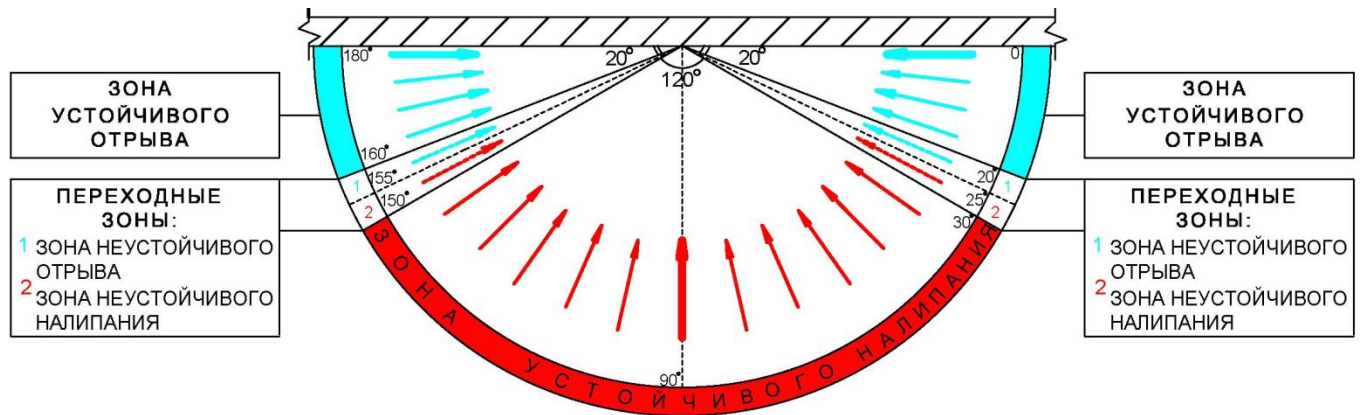


Рисунок 3.7 – Исследуемые направления воздушного потока к вертикальной поверхности

При значениях направлений воздушного потока к вертикальной поверхности, находящихся в диапазонах  $20^\circ\div 30^\circ$  и  $150^\circ\div 160^\circ$ , которые именуются «переходными зонами», происходит частичное налипание и частичный отрыв частиц пыли (рисунок 3.7):

1. При значениях направлений воздушного потока к вертикальной поверхности, находящихся в диапазонах  $25^\circ\div 30^\circ$  и  $150^\circ\div 155^\circ$ , называемых «зонами неустойчивого налипания», частицы преимущественно налипают на поверхность.

2. При значениях направлений воздушного потока к вертикальной поверхности, находящихся в диапазонах  $20^\circ\div 25^\circ$  и  $155^\circ\div 160^\circ$ , называемых «зонами неустойчивого отрыва», частицы преимущественно отрываются с поверхности.

Однако, при отдельных режимах скоростей воздушного потока к вертикальной поверхности допускается незначительный отрыв частиц пыли в «зоне неустойчивого налипания» и незначительное налипание пыли в «зоне неустойчивого отрыва» на вертикальных поверхностях.

### 3.8 Выводы по главе 3

1. Разработана экспериментальная установка для запыления вертикальной пластины, позволяющая в лабораторных условиях исследовать процесс адгезии (налипания и отрыва) частиц пыли на вертикальных поверхностях, выполненных из различных строительных и отделочных материалов.

2. План экспериментов по налипанию и отрыву частиц городской пыли на вертикальных поверхностях представляет собой матрицу планирования, соответствующую ЦКРП, и имеет в основе план полного факторного эксперимента.

3. Были проведены экспериментальные исследования налипания ААГС на такие вертикальные поверхности, как стеклянная, металлическая, оштукатуренная, окрашенная поверхности. Получены регрессионные зависимости налипания от четырёх случайных факторов: концентрации пыли в воздушном потоке, максимального размера частиц, скорости воздушного потока, направления воздушного потока к вертикальной поверхности.

4. Были проведены экспериментальные исследования отрыва частиц городской пыли с таких вертикальных поверхностей, как стеклянная, металлическая, оштукатуренная, окрашенная поверхности. Получены регрессионные зависимости отрыва частиц городской пыли от трёх случайных факторов: плотности налипания пыли на вертикальной поверхности, скорости воздушного потока, направления воздушного потока к вертикальной поверхности.

5. Установлено, что в обоих экспериментальных исследованиях наиболее значимыми являются скорость воздушного потока и направление воздушного потока к вертикальной поверхности. Однако, при отрыве частиц, кроме данных факторов, особую значимость имеет величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальные поверхности.



6. Экспериментально доказано, что запыление вертикальных поверхностей осуществляется в «зоне устойчивого налипания» при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $30^{\circ} \div 150^{\circ}$ , а отрыв частиц пыли с вертикальных поверхностей осуществляется «зонах устойчивого отрыва» при направлениях воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазонах  $0^{\circ} \div 20^{\circ}$  и  $160^{\circ} \div 180^{\circ}$ .

7. Адекватность математических моделей определялась по критерию Фишера, значимость вычисленных коэффициентов регрессионных зависимостей налипания и отрыва частиц ААГС с вертикальных поверхностей от случайных факторов определялась по критерию Стьюдента, оценка воспроизводимости полученных результатов проводилась при помощи критерия Кохрена

## ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДГЕЗИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (ААГС) НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### 4.1 Теоретические расчёты суммарного налипания ААГС на различные вертикальные поверхности

Результаты экспериментальных исследований влияния атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на загрязнение вертикальных поверхностей зданий и сооружений показали, что регрессионная зависимость налипания ААГС на вертикальные поверхности  $\gamma_{F(\text{массовая доля})}$  от четырех случайных факторов, таких как  $C$ ,  $\text{мг/м}^3$  – концентрации пыли в воздушном потоке;  $d$ ,  $\text{мкм}$  – максимального размера частиц;  $V$ ,  $\text{м/с}$  – скорости воздушного потока;  $\varphi$  – косинуса угла воздушного потока к вертикальной поверхности, представляют собой полином второй степени для стеклянной – формула (3.6) и металлической (стальной) – формула (3.8) поверхностей, а также полином первой степени для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – формула (3.7).

При условии, что из 8 румбов, характеризующих направление ветра, максимальным количеством его направлений, способствующих налипанию пыли на вертикальные поверхности зданий и сооружений, согласно экспериментальным исследованиям (рисунок 3.7), является 3 направления, а также с учетом значимости таких случайных факторов, как скорость и направление воздушного потока к вертикальной поверхности, суммарное налипание ААГС на вертикальные поверхности за отрезок времени  $\tau$  будет вычисляться по формуле (4.1):

$$\Delta G_{\text{налип}} = \sum_{i=1}^3 \tau_i \int_0^{V_0} \gamma_{F(\text{массовая доля})}(C, d, V, \varphi) \cdot C \cdot V \cdot \sqrt{1 - \varphi^2} dF(V) \quad (4.1)$$

где  $\gamma_{F(\text{массовая доля})}$  – массовая доля налипших частиц городской пыли к пыли в набегающем на поверхность воздушном потоке;

$C$  – концентрация пыли в воздухе;

$V$  – скорость воздушного потока;

$F(V)$  – интегральная функция распределения скорости ветра.

Так как распределение скоростей воздушного потока, на основании [5,8,9,46], описывается законом Вейбулла, то интегральная функция имеет вид:

$$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} \quad (4.2)$$

где  $k$  – параметр формы распределения;

$\beta$  – параметр масштаба распределения.

Плотность распределения задается формулой (4.3):

$$f(V, k, \beta) = \frac{k}{\beta} \left(\frac{V}{\beta}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} = \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} \quad (4.3)$$

Вычислим интеграл (4.4) для наиболее характерных для городской среды вертикальных поверхностей в пп. 4.1.1–4.1.3, где  $V_0 \rightarrow \infty$ :

$$J = \int_0^{V_0} \gamma_{F(\text{массовая доля})}(\varphi, V, d, C) \cdot C \cdot V \cdot \sqrt{1 - \varphi^2} dF(V) \quad (4.4)$$

#### 4.1.1 Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на стеклянную поверхность

Запишем регрессионную зависимость налипания ААГС на стеклянную поверхность  $\gamma_{F(\text{массовая доля})ст.}$  от четырех случайных факторов (3.6) в общем виде:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})ст.} = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi + a_6 C^2 + a_7 d^2 \quad (4.5)$$

где  $a_1 = 0,00235$ ;  $a_2 = -0,00589$ ;  $a_3 = -0,0002988$ ;  $a_4 = 0,00087$ ;  $a_5 = 0,0055$ ;  $a_6 = 0,003992$ ;  $a_7 = 0,00000998$ . Подставим формулу (4.5) в формулу (4.4):

$$J_{cm} = \int_0^{V_0} (a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi + a_6 C^2 + a_7 d^2) \cdot C \cdot V \cdot \sqrt{1 - \varphi^2} \cdot \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \quad (4.6)$$

Обозначим  $m = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_5 \varphi + a_6 C^2 + a_7 d^2$ , тогда интеграл (4.6) примет вид:

$$J_{cm} = C \cdot \sqrt{1 - \varphi^2} \frac{k}{\beta^k} \left( m \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV + a_4 \int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \right) \quad (4.7)$$

Вычислим интегралы (4.8) и (4.9), используя подстановку  $t = \frac{V^k}{\beta^k}$ , в таком случае

$$V = \beta \cdot t^{\frac{1}{k}} \quad \text{и} \quad dt = \frac{k V^{k-1}}{\beta^k} dV.$$

$$\int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^{k+1}}{k} \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{1}{k}} e^{-t} dt \quad (4.8)$$

$$\int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^{k+2}}{k} \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{2}{k}} e^{-t} dt \quad (4.9)$$

Для вычисления интеграла в правой части (4.8) разложим подынтегральную функцию в степенной ряд:

$$e^{-t} = 1 - t + \frac{t^2}{2!} - \frac{t^3}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^n}{n!} + \dots \quad (4.10)$$

$$t^{\frac{1}{k}} e^{-t} = t^{\frac{1}{k}} - t^{\frac{1}{k}+1} + \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{2!} - \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n}}{n!} + \dots$$

Или

$$\int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{1}{k}} e^{-t} dt = \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \left( t^{\frac{1}{k}} - t^{\frac{1}{k}+1} + \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{2!} - \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n}}{n!} + \dots \right) dt \quad (4.11)$$

Подставляя последнее выражение (4.11) в формулу (4.8) и интегрируя, получим следующее значение интеграла:

$$\int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^{k+1}}{k} \left[ \frac{t^{\frac{1}{k}+1}}{\frac{1}{k}+1} - \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{\frac{1}{k}+2} + \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n+1}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!} + \dots \right] \Bigg|_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \quad (4.12)$$

В скобках знакочередующийся ряд, который сходится абсолютно, т.к., по признаку Даламбера, сходится ряд, составленный из абсолютных величин членов исходного ряда. Докажем это, для этого найдем предел отношения последующего члена ряда к предыдущему при стремлении  $n \rightarrow \infty$ . В нашем случае:

$$u_n = \frac{t^{\frac{1}{k}+n+1}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!}; \quad u_{n+1} = \frac{t^{\frac{1}{k}+n+2}}{\left(\frac{1}{k}+n+2\right) \cdot (n+2)!};$$

В таком случае  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = |t| \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!}{\left(\frac{1}{k}+n+2\right) \cdot (n+2)!} = |t| \cdot 0 = 0 < 1.$  (4.13)

Следовательно, при любом значении  $0 < t < \infty$  исходный ряд сходится абсолютно.

Возвращаясь к старой переменной, получим окончательное значение интеграла (4.8):

$$\begin{aligned} \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV &= \frac{\beta^{k+1}}{k} \left[ \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+1\right)}}{\frac{1}{k}+1} - \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+2\right)}}{\frac{1}{k}+2} + \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+3\right)}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2!} + \dots + (-1)^n \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+n+1\right)}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!} + \dots \right] = \\ &= \frac{\beta^{k+1}}{k} \left[ \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k}+1\right) \beta^{1+k}} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right) \beta^{1+2k}} + \frac{V_0^{1+3k}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{1+3k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{1+(n+1)k}} + \dots \right] = \\ &= \frac{1}{k} \left[ \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k}+1\right)} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right) \beta^k} + \frac{V_0^{1+3k}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{2k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right]. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Аналогично найдем значение интеграла (4.9):

$$\begin{aligned}
 \int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV &= \frac{\beta^{k+2}}{k} \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{2}{k}} e^{-t} dt = \\
 &= \frac{\beta^{k+2}}{k} \left( \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{2}{k}+1\right)}}{\frac{2}{k}+1} - \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{2}{k}+2\right)}}{\frac{2}{k}+2} + \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{2}{k}+3\right)}}{\left(\frac{2}{k}+3\right) \cdot 2!} + \dots + (-1)^n \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{2}{k}+n+1\right)}}{\left(\frac{2}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!} + \dots \right) = \\
 &= \frac{1}{k} \left( \frac{V_0^{2+k}}{\left(\frac{2}{k}+1\right)} - \frac{V_0^{2+2k}}{\left(\frac{2}{k}+2\right) \beta^k} + \frac{V_0^{2+3k}}{\left(\frac{2}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{2k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{2+(n+1)k}}{\left(\frac{2}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right). \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Подставляя значения интегралов (4.14 – 4.15) в формулу (4.7), получим значение интеграла  $J$ :

$$\begin{aligned}
 J_{cm} &= C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{k}{\beta^k} \left( m \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV + a_4 \int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \right) = \\
 &= C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{m}{\beta^k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k}+1\right)} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right) \beta^k} + \frac{V_0^{1+3k}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{2k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right) + \\
 &+ C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{m}{\beta^k} \left( \frac{V_0^{2+k}}{\left(\frac{2}{k}+1\right)} - \frac{V_0^{2+2k}}{\left(\frac{2}{k}+2\right) \beta^k} + \frac{V_0^{2+3k}}{\left(\frac{2}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{2k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{2+(n+1)k}}{\left(\frac{2}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right) \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

Знакопередающийся ряд сходится быстро при  $0 < V_0 \leq 7$  м/с, а при  $V_0 > 8$  м/с ряд сходится очень медленно, т.е. для получения приближенного значения его суммы с указанной степенью точности необходимо вычислять большое количество слагаемых. В этом случае данный интеграл можно вычислить с помощью приближенных методов [1,57,96].

Выразим из формул (4.8) и (4.9) интегралы и обозначим их  $I$  и  $I_I$ :

$$I = \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{1}{k}} e^{-t} dt \quad (4.17)$$

$$I_1 = \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{2}{k}} e^{-t} dt \quad (4.18)$$

Тогда интеграл  $J$  можно вычислить приближенно по формуле (4.19):

$$J_{cm} = C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{k}{\beta^k} \left( \frac{m\beta^{k+1}}{k} \cdot I + \frac{a_4\beta^{k+2}}{k} \cdot I_1 \right) = C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} (m\beta I + a_4\beta^2 I_1) \quad (4.19)$$

Подставив (4.19) в (4.20), получим формулу для расчёта суммарного налипания ААГС на стеклянную поверхность за отрезок времени  $\tau$ :

$$\Delta G_{\text{налип.ст.}} = \sum_{i=1}^3 \tau_i \cdot J_{\text{ст}} \quad (4.20)$$

#### 4.1.2 Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на оштукатуренную и окрашенную поверхности

Запишем регрессионную зависимость налипания ААГС на оштукатуренную и окрашенную поверхности  $\gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{шт.}}}$  от четырех случайных факторов (3.7) в общем виде:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{шт.}}} = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi \quad (4.21)$$

где  $a_1 = -0,00472$ ;  $a_2 = 0,002432$ ;  $a_3 = 0,0001104$ ;  $a_4 = 0,001114$ ;  $a_5 = 0,006667$ .

Подставим формулу (4.21) в формулу (4.4):

$$J_{\text{шт}} = \int_0^{V_0} (a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi) \cdot C \cdot V \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \cdot \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV =$$

$$= C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{k}{\beta^k} \left( m_1 \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV + a_4 \int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \right), \quad (4.22)$$

где  $m_1 = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_5 \varphi$ .

Так как формула (4.22) имеет тот же самый вид, что и формула (4.7) для стеклянной поверхности, то для расчетов можно использовать формулы (4.16) и (4.19), где коэффициент  $m$  необходимо заменить на  $m_1$ .

Подставив (4.22) в (4.23), получим формулу для расчёта суммарного налипания ААГС на оштукатуренную и окрашенную поверхности за отрезок времени  $\tau$ :

$$\Delta G_{\text{налип.шт.}} = \sum_{i=1}^3 \tau_i \cdot J_{\text{шт}} \quad (4.23)$$

### 4.1.3 Теоретический расчёт суммарного налипания ААГС на металлическую поверхность

Запишем регрессионную зависимость налипания ААГС на на металлическую поверхность  $\gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{мет.}}}$  от четырех случайных факторов (3.8) в общем виде:

$$\gamma_{F(\text{массовая доля})_{\text{мет.}}} = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi + a_6 d^2 + a_7 V \varphi + a_8 d \varphi \quad (4.24)$$

где  $a_1 = -0,002737$ ;  $a_2 = 0,00195$ ;  $a_3 = -0,00024$ ;  $a_4 = 0,0005$ ;  $a_5 = -0,000319$ ;  $a_6 = 0,000009$ ;  $a_7 = 0,00078$ ;  $a_8 = 0,0001589$ .

Подставим формулу (4.24) в формулу (4.4):

$$J_{\text{мет}} = \int_0^{V_0} (a_1 + a_2 C + a_3 d + a_4 V + a_5 \varphi + a_6 d^2 + a_7 V \varphi + a_8 d \varphi) \cdot C \cdot V \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \cdot \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV =$$



$$= C \cdot \sqrt{1-\varphi^2} \frac{k}{\beta^k} \left( m_2 \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV + m_3 \int_0^{V_0} V^{k+1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \right) \quad (4.25)$$

где  $m_2 = a_1 + a_2 C + a_3 d + a_5 \varphi + a_6 d^2 + a_8 d \varphi$ ;  $m_3 = a_4 + a_7 V \varphi$ .

Аналогично получим формулу для расчёта суммарного налипания ААГС на металлической поверхности за отрезок времени  $\tau$ :

$$\Delta G_{\text{налип.мет.}} = \sum_{i=1}^3 \tau_i \cdot J_{\text{мет}} \quad (4.26)$$

## 4.2 Теоретические расчёты изменения величины слоя пыли, вызванного отрывом её частиц с различных вертикальных поверхностей

При исследовании отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей зданий и сооружений важную роль играют такие факторы, как  $G$ , мг/м<sup>2</sup> – величина ранее налипшего на вертикальную поверхность слоя пыли;  $V$ , м/с – скорость воздушного потока;  $\varphi$  – косинус угла воздушного потока к вертикальной поверхности. Величина налипшего слоя пыли на наиболее характерные для городской среды вертикальные поверхности рассмотрена в п.п. 4.1, 4.1.1-4.1.3 и определяется по следующим формулам: для стеклянной поверхности – (4.20), для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – (4.23), для металлической поверхности – (4.26). Результаты экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей зданий и сооружений показали, что регрессионные зависимости для отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей  $\gamma A_{\text{отр}}$  от трёх случайных факторов представляют собой полином второй степени для стеклянной – формула (3.15) и металлической

(стальной) – формула (3.16) поверхностей, а также полином первой степени для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – формула (3.14).

Введём величину, характеризующую изменение толщины слоя пыли, которое вызвано отрывом её частиц с различных вертикальных поверхностей, наиболее характерных для городской среды. Она определяется по формуле (4.27). На небольшом интервале времени  $\tau$ , например, в течение дня, предположим, что величины  $V$  и  $\varphi$  являются постоянными, т.е.  $V=const$ ,  $\varphi=const$ .

$$dG_{отр\ i} = \gamma A_{отр} \cdot G_{налип\ i} d\tau \quad (4.27)$$

где  $G_{налип\ i}$  – величина ранее налипшего слоя пыли на различных вертикальных поверхностях, убывающая,  $мг/м^2$ ;

$\gamma A_{отр}$  – массовая доля частиц городской пыли, которые отрываются с поверхности, под действием ветра в единицу времени, отрицательная величина,  $1/с$ :  $\gamma A_{отр} = \frac{d\alpha_F}{d\tau}$  [52].

#### 4.2.1 Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на оштукатуренной и окрашенной поверхностях

Запишем полученную ранее регрессионную зависимость отрыва частиц городской пыли с оштукатуренной и окрашенной поверхностей  $\gamma A_{отр.шт.}$  от трёх случайных факторов (3.14) в общем виде:

$$\gamma A_{отр.шт.} = a_1 + a_2 \cdot G + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \varphi + a_5 G \cdot \varphi + a_6 V \cdot \varphi \quad (4.28)$$

где  $a_1 = -0,99527$ ;  $a_2 = -0,00007$ ;  $a_3 = 0,00108$ ;  $a_4 = -0,00378$ ;  $a_5 = 0,00033$ ;  $a_6 = -0,001086$ .

Подставим уравнение (4.28) в дифференциальное уравнение (4.27), произведём некоторые преобразования и получим:

$$dG_{um} = (r + s \cdot G) \cdot G d\tau \quad (4.29)$$

где  $r = a_1 + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \varphi + a_6 V \cdot \varphi$ ;  $s = a_2 + a_5 \varphi$ .

Найдём решение дифференциального уравнения (4.29) при начальном условии  $G|_{\tau=0} = G_0$  и постоянстве величин  $V$  и  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} \frac{dG}{(r + s \cdot G) \cdot G} &= d\tau; \int \frac{dG}{(r + s \cdot G) \cdot G} = \int d\tau; \\ \int \frac{dG}{(r + s \cdot G) \cdot G} &= -\frac{s}{r} \int \frac{dG}{r + s \cdot G} + \frac{1}{r} \int \frac{dG}{G} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Получим общее решение данного уравнения:

$$\begin{aligned} -\frac{s}{r} \cdot \frac{1}{s} \ln|r + s \cdot G| + \frac{1}{r} \ln|G| &= \tau + c; \\ \frac{1}{r} \ln \frac{G}{r + s \cdot G} &= \tau + c \end{aligned} \quad (4.31)$$

Таким образом, величина слоя пыли, изменение которой вызвано отрывом частиц с оштукатуренной и окрашенной вертикальных поверхностей, определяется по формуле (4.32)

$$G_{\text{отр.шт.}} = \frac{r}{e^{-r \cdot \tau - c_1} - s} \quad (4.32)$$

где  $c_1 = \ln \frac{G_0}{r + s \cdot G_0}$  – константа интегрирования.

#### 4.2.2 Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на стеклянной поверхности

Запишем полученное ранее регрессионную зависимость отрыва частиц городской пыли со стеклянной поверхности  $\gamma A_{\text{отр.ст.}}$  от трёх случайных факторов (3.15) в общем виде:

$$\gamma A_{\text{omp.cm.}} = a_1 + a_2 \cdot G + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \varphi + a_5 G^2 + a_6 \varphi^2 \quad (4.33)$$

где  $a_1 = -0,99499$ ;  $a_2 = 0,00012$ ;  $a_3 = 0,000005$ ;  $a_4 = -0,0074$ ;  $a_5 = 0,000005$ ;  $a_6 = 0,00376$ .

Подставим уравнение (4.33) в формулу (4.27), произведём некоторые преобразования и получим:

$$dG = (h + j \cdot G + k \cdot G^2) \cdot G d\tau \quad (4.34)$$

где  $h = a_1 + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \varphi + a_6 \varphi^2$ ;  $j = a_2$ ;  $k = a_5$ .

Найдём решение дифференциального уравнения (4.34) при начальном условии  $G|_{\tau=0} = G_0$  и постоянстве величин  $V$  и  $\varphi$ :

$$dG = k \cdot \left( G^2 + \frac{j}{k} \cdot G + \frac{h}{k} \right) \cdot G d\tau \quad (4.35)$$

Произведём замену:  $a = \frac{h}{k}$ ,  $b = \frac{j}{k}$ , тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{dG}{k \cdot (G^2 + b \cdot G + a) \cdot G} = d\tau \quad (4.36)$$

Корнями квадратного трёхчлена  $G^2 + b \cdot G + a$  являются следующие числа:  $w_1 = 435,0503$ ;  $w_2 = -459,0503$ . Интегрируя обе части уравнения, получим общий интеграл:

$$\frac{1}{k \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} \cdot \ln|G - w_1| + \frac{1}{k \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \ln|G - w_2| + \frac{1}{k \cdot w_1 \cdot w_2} \cdot \ln|G| = \tau + c \quad (4.37)$$

где  $C = \frac{1}{k \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} \cdot \ln|G_0 - w_1| + \frac{1}{k \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \ln|G_0 - w_2| + \frac{1}{k \cdot w_1 \cdot w_2} \cdot \ln|G_0|$  – константа интегрирования.

Введём следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{k \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} = 0,514; \\ \alpha_2 &= \frac{1}{k \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} = 0,487; \\ \alpha_3 &= \frac{1}{k \cdot w_1 \cdot w_2} = -1,001. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Найдём константу интегрирования, учитывая, что при  $\tau=0$   $G=G_0$ :

$$c = \alpha_1 \cdot \ln|G_0 - w_1| + \alpha_2 \cdot \ln|G_0 - w_2| + \alpha_3 \cdot \ln|G_0| \quad (4.39)$$

Перепишем уравнение (4.37) в виде:

$$\alpha_1 \cdot \ln|G - w_1| + \alpha_2 \cdot \ln|G - w_2| + \alpha_3 \cdot \ln|G| = \tau + \alpha_1 \cdot \ln|G_0 - w_1| + \alpha_2 \cdot \ln|G_0 - w_2| + \alpha_3 \cdot \ln|G_0|$$

Или

$$\alpha_1 \cdot \ln \left| \frac{G - w_1}{G_0 - w_1} \right| + \alpha_2 \cdot \ln \left| \frac{G - w_2}{G_0 - w_2} \right| + \alpha_3 \cdot \ln \left| \frac{G}{G_0} \right| = \tau \quad (4.40)$$

Произведём преобразования:

$$\alpha_1 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - \frac{w_1}{G_0}}{1 - \frac{w_1}{G_0}} \right| + \alpha_2 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - \frac{w_2}{G_0}}{1 - \frac{w_2}{G_0}} \right| + \alpha_3 \cdot \ln \left| \frac{G}{G_0} \right| = \tau \quad (4.41)$$

Обозначим  $\frac{w_1}{G_0} = r_1$ ;  $\frac{w_2}{G_0} = r_2$  и получим следующее выражение:

$$\alpha_1 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - r_1}{1 - r_1} \right| + \alpha_2 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - r_2}{1 - r_2} \right| + \alpha_3 \cdot \ln \left| \frac{G}{G_0} \right| = \tau \quad (4.42)$$

Так как разрешить данное уравнение относительно  $G$  не представляется возможным, то найдём решение данного уравнения графическим методом, который рассмотрен в п. 5.1.2.

### 4.2.3 Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на металлической поверхности

Запишем полученную ранее регрессионную зависимость отрыва частиц городской пыли с металлической поверхности  $\gamma A_{отр.мет.}$  от трёх случайных факторов (3.16) в общем виде:

$$\gamma A_{\text{отр.мет.}} = a_1 + a_2 \cdot G + a_3 G^2 \quad (4.43)$$

где  $a_1 = -0,99837$ ;  $a_2 = 0,00013$ ,  $a_3 = 0,000005$ .

Подставим уравнение (4.43) в формулу (4.27), произведём некоторые преобразования и получим:

$$dG = (l + m \cdot G + n \cdot G^2) \cdot G d\tau \quad (4.44)$$

где  $l = a_1$ ,  $m = a_2$ ,  $n = a_3$ .

Найдём решение дифференциального уравнения (4.44) при начальном условии  $G|_{\tau=0} = G_0$  и постоянстве величин  $V$  и  $\varphi$ :

$$dG = n \cdot (G^2 + \frac{m}{n} \cdot G + \frac{l}{n}) \cdot G d\tau \quad (4.45)$$

Произведём замену:  $a = \frac{l}{n}$ ,  $b = \frac{m}{n}$ , тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{dG}{n \cdot (G^2 + b \cdot G + a) \cdot G} = d\tau \quad (4.46)$$

Корнями квадратного трёхчлена  $G^2 + b \cdot G + a$  являются следующие числа:  $w_1 = 434,0380$ ;  $w_2 = -460,0380$ . Интегрируя обе части уравнения, получим общий интеграл:

$$\frac{1}{n \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} \cdot \ln|G - w_1| + \frac{1}{n \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \ln|G - w_2| + \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot w_2} \cdot \ln|G| = \tau + c \quad (4.47)$$

где  $C = \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} \cdot \ln|G_0 - w_1| + \frac{1}{n \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \ln|G_0 - w_2| + \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot w_2} \cdot \ln|G_0|$  – константа интегрирования.

Введём следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot (w_1 - w_2)} = 0,515; \\ \alpha_2 &= \frac{1}{n \cdot w_2 \cdot (w_2 - w_1)} = 0,486; \\ \alpha_3 &= \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot w_2} = -1,002. \end{aligned} \quad (4.48)$$

Проведём преобразования, аналогично с выражениями для стеклянной поверхности (4.39) – (4.42) и получим следующее уравнение:

$$\alpha_1 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - r_1}{1 - r_1} \right| + \alpha_2 \cdot \ln \left| \frac{\frac{G}{G_0} - r_2}{1 - r_2} \right| + \alpha_3 \cdot \ln \left| \frac{G}{G_0} \right| = \tau \quad (4.49)$$

Так как разрешить данное уравнение относительно  $G$  также, как и для стеклянной поверхности, не представляется возможным, то найдём решение данного уравнения графическим методом, который рассмотрен в п. 5.1.2.

### **4.3 Натурные исследования загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений ААГС**

При исследовании загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС) важную роль играют случайные факторы, от значения которых зависит процесс адгезии (налипание и отрыв) частиц ААГС на вертикальных поверхностях строительных объектов. Наиболее значимыми при налипании пыли на вертикальные поверхности, которое осуществляется при направлении ветра к вертикальной поверхности здания в диапазоне  $30^\circ \div 150^\circ$ . являются такие факторы, как скорость и направление ветра, концентрация ААГС. Концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе городов является случайной величиной и не зависит от скорости и направления ветра в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности. Были исследованы максимальные разовые концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе, которые замерялись в местах проведения натурных изысканий в течение всего периода наблюдений. На

основании данных значений вычислялось среднее месячное значение концентрации ААГС в воздухе. Замеры проводились измерителем массовой концентрации аэрозольных частиц CEL 712 Microdust pro. При отсутствии данных о концентрации пыли в атмосферном воздухе, в первом приближении значение концентрации в расчетах может быть принято равным ПДК, то есть  $0,5 \text{ мг/м}^3$  [11]. Более точные значения концентрации ААГС в последнем случае при «положительном» (налипание частиц) и «отрицательном» (отрыв частиц) диапазонах изменения направления ветра можно рассчитывать на основании учета межрайонного переноса пыли (вредностей) по методике [5,8,9,46].

Расчет натурального суммарного налипания ААГС на вертикальные поверхности зданий и сооружений за исследуемый период времени производится по формуле (4.50).

$$G_{\text{налип.натур.}} = \int_{\Omega} \gamma_{F(\text{массовая доля})} (c(\tau) \cdot V(\tau) \cdot d(\tau) \cdot \varphi(\tau)) \cdot c \cdot V \cdot \sin\varphi \, d\tau \quad (4.50)$$

где  $\gamma_{F(\text{массовая доля})}$  – массовая доля налипших частиц городской пыли к пыли в набегающем на поверхность воздушном потоке;

$c$  – концентрация пыли в воздухе,  $\text{мг/м}^3$ ;

$V$  – скорость ветра,  $\text{м/с}$ ;

$d$  – максимальный диаметр частиц,  $\text{мкм}$ ;

$\sin\varphi$  – направление ветра к вертикальной поверхности в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальную поверхность;

$\tau$  – временной интервал, с.

Процесс отрыва частиц пыли с вертикальной поверхности зданий и сооружений осуществляется при направлениях воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $0 \div 20^\circ$  и  $160^\circ \div 180^\circ$ . Наибольшей значимостью при данном процессе обладает величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальных поверхностях строительных конструкций. Расчет изменения величины слоя пыли, вызванного



отрывом частиц с вертикальных поверхностей объектов за временной интервал  $\tau$  производится по следующим формулам:

$$dG_{\text{отр.натур.}} = \gamma A_{\text{отр.}} \cdot G \cdot \cos\varphi d\tau \quad (4.51)$$

где  $\gamma A_{\text{отр.}}$  – массовая доля частиц городской пыли, которые отрываются с поверхности, под действием ветра в единицу времени, отрицательная величина, 1/с:

$$\gamma A_{\text{отр.}} = \frac{d\alpha_F}{d\tau} [52];$$

$G$  – величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальных поверхностях, мг/м<sup>2</sup>;

$\cos\varphi$  – направление ветра к вертикальной поверхности в «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц пыли с вертикальной поверхности;

$\tau$  – временной интервал, с.

Данные величины характеризуют запыление поверхности, т.е. массу пыли на квадратный метр вертикальной поверхности после воздействия ветров в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание ААГС на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц с вертикальных поверхностей зданий и сооружений.

Натурные исследование по оценке степени загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, проводились во многих районах г. Волгограда. Для примера рассмотрим загрязнение объектов, расположенных в Центральном районе г. Волгограда в непосредственной близости к одной из основных автодорог города (1-я Продольная магистраль) (рисунок 4.1), за 2018 год. В качестве экспозиционной пробоотборной площадки выступает подветренная область фасада здания или сооружения, с которой с установленной частотой проводится сбор пыли, находящейся на вертикальной поверхности, и её последующие исследования (изучение дисперсного состава (п. 2.2.2), химического (элементного) состава (п. 2.2.3), показателей массы (п. 4.3) и других характеристик). Значения скорости и направления ветра для Волгограда были взяты, согласно [79], значения величины

слоя пыли на исследуемых вертикальных поверхностях фасадов зданий за январь 2018 г., июль 2018г., а также годовые значения приведены в приложении В.

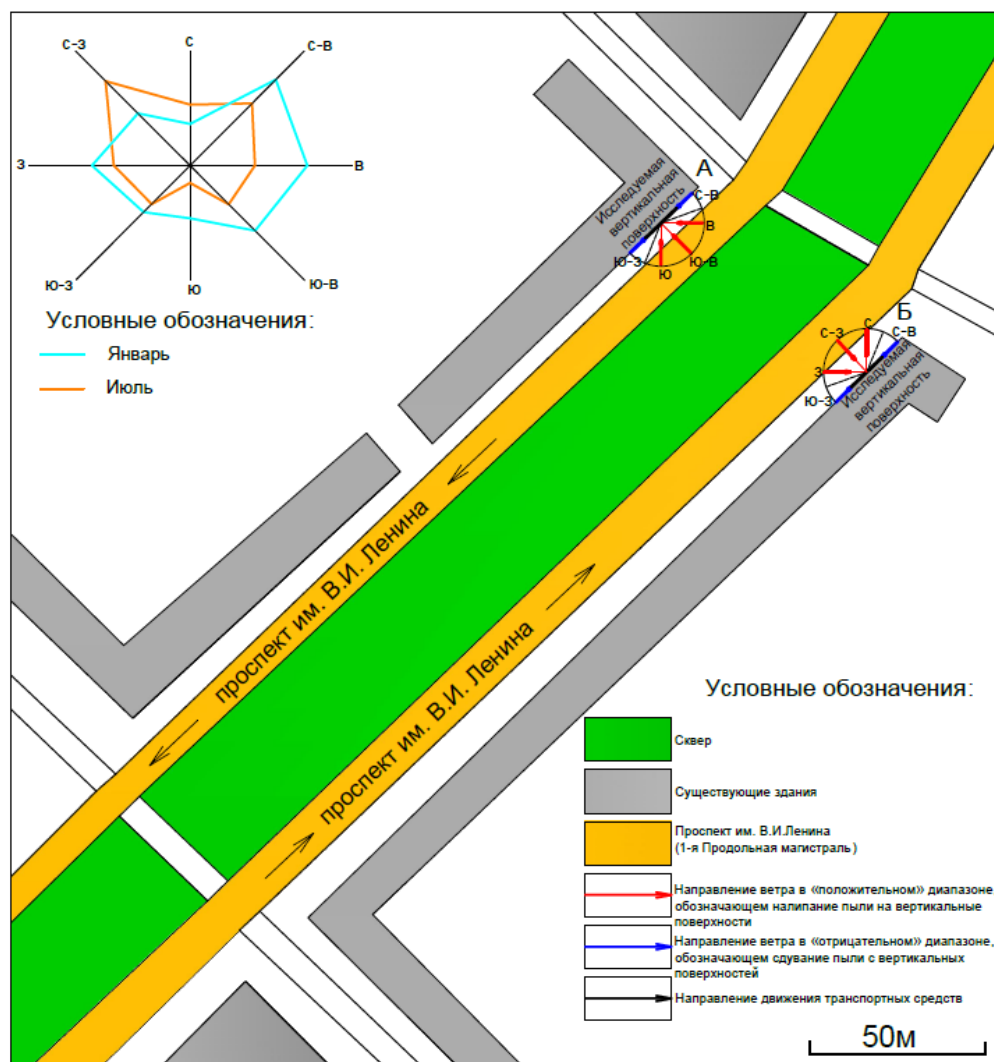


Рисунок 4.1 – Место проведения натурных исследований

На начало января области фасадов зданий А и Б (рисунок 4.1), выполняющие роль пробоотборных площадок, предварительно были очищены, т.е. величина слоя пыли на вертикальных поверхностях  $G_0$  принята равной нулю. К концу января величина слоя пыли на фасаде здания А также равна нулю, а на фасаде здания Б составила  $109,14 \text{ мг/м}^2$  – расчётное значение и  $100 \text{ мг/м}^2$  – натурное значение (рисунок 4.2).

## Условные обозначения:

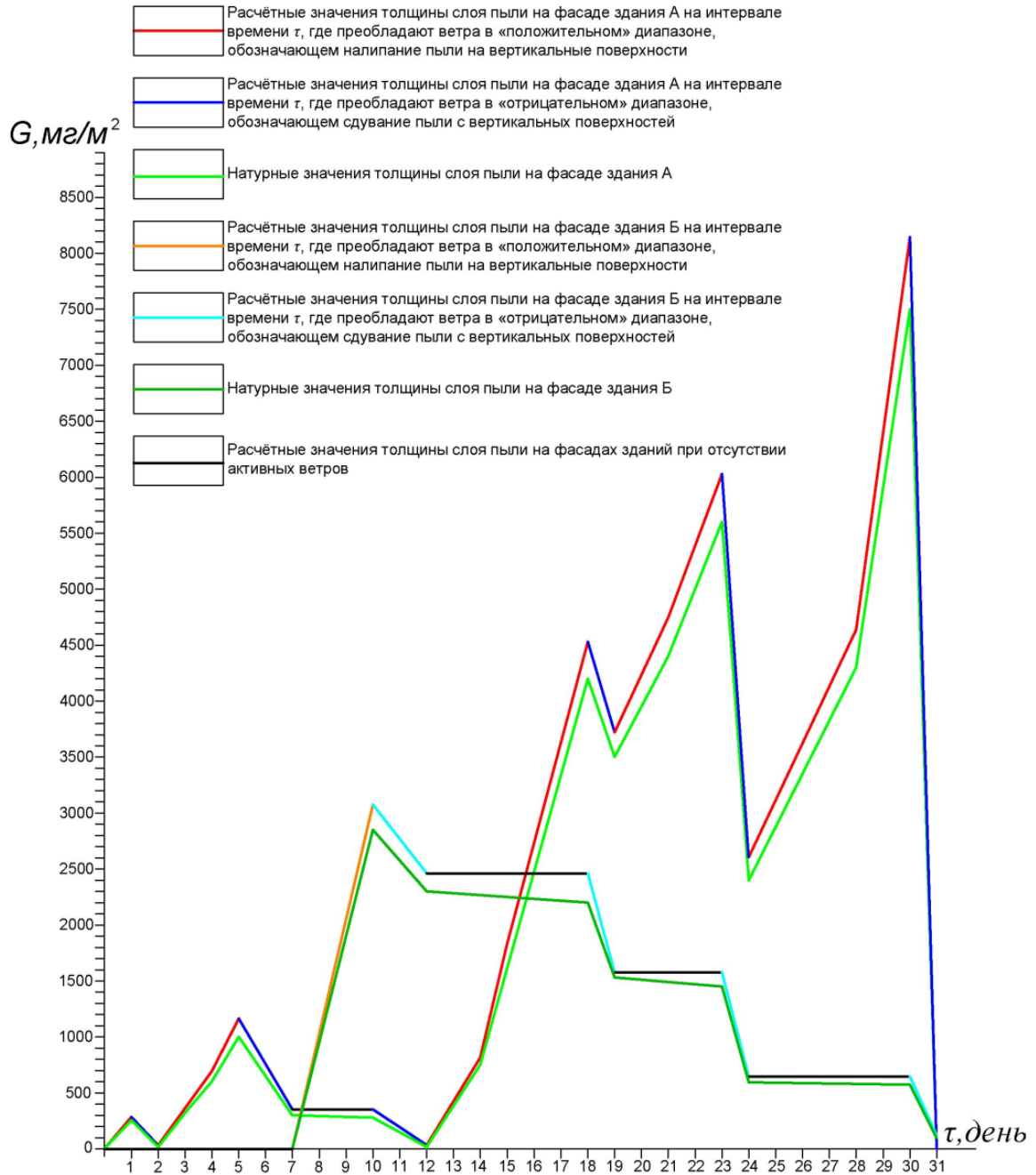


Рисунок 4.2 – Динамика загрязнения вертикальных поверхностей фасадов зданий А и Б за январь 2018 г.

На начало июля величина слоя пыли на фасаде здания А составила  $9547,24 \text{ mg/m}^2$  – расчётное значение и  $8800 \text{ mg/m}^2$  – натурное значение; величина слоя пыли на фасаде здания Б оказалась равной  $3937,75 \text{ mg/m}^2$  – расчётное значение и  $3700 \text{ mg/m}^2$  –

натурное значение. К концу июля величина слоя пыли на фасаде здания А вновь оказалась равной нулю, а на фасаде здания Б составила 3194,44 мг/м<sup>2</sup> – расчётное значение и 3000 мг/м<sup>2</sup> – натурное значение (рисунок 4.3).

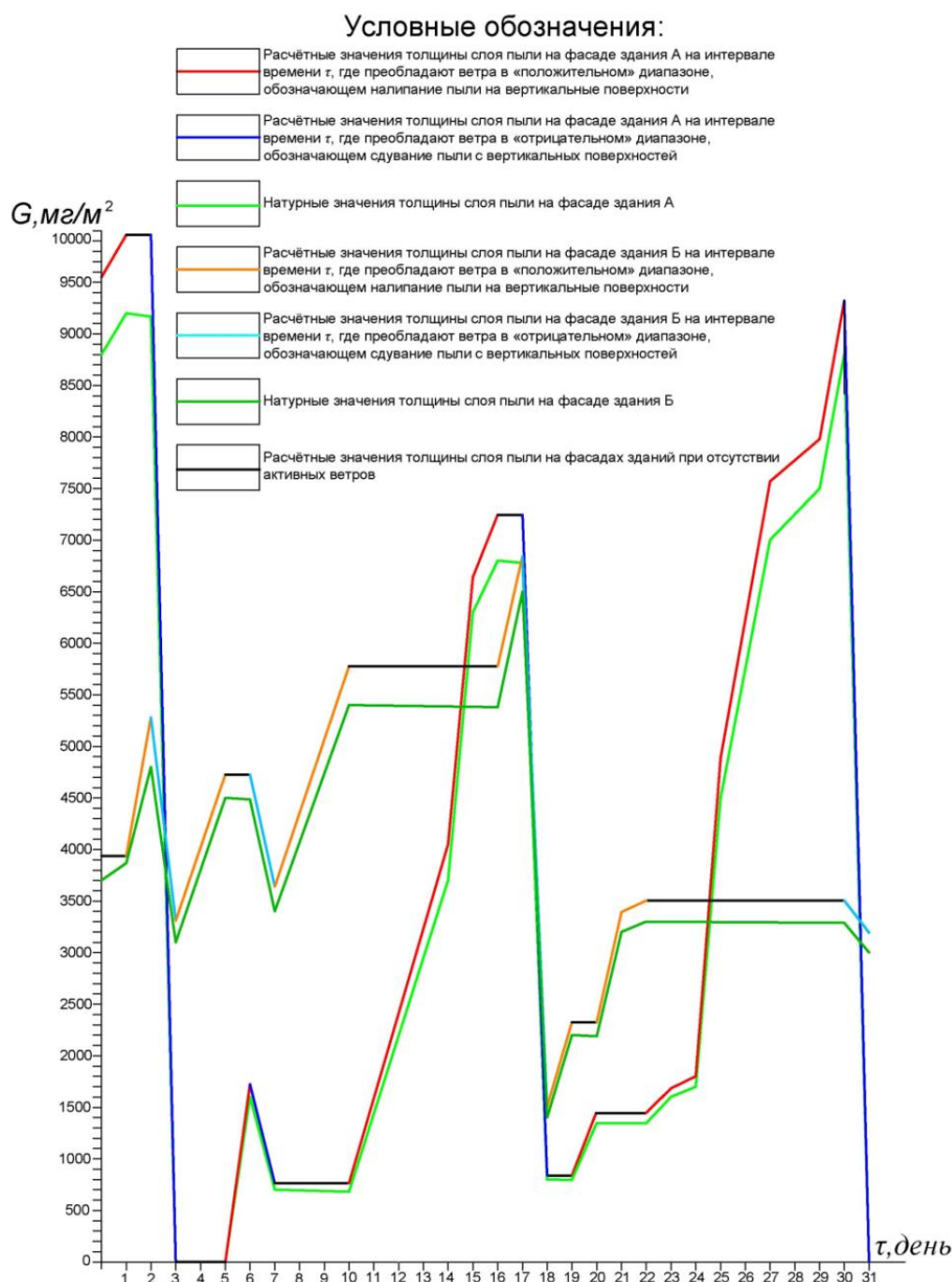


Рисунок 4.3 – Динамика загрязнения вертикальных поверхностях фасадов зданий А и Б за июль 2018 г.

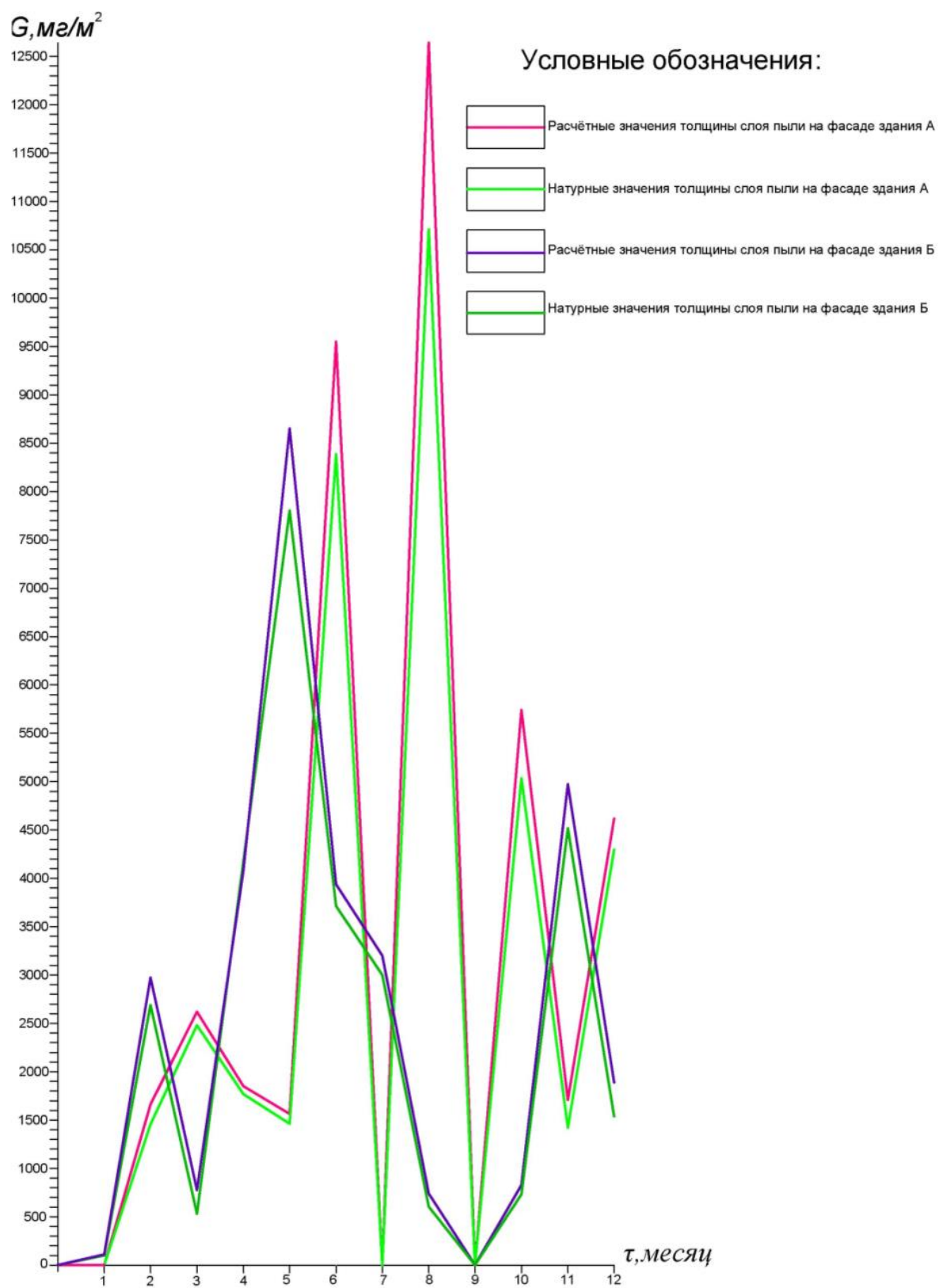


Рисунок 4.4 – Динамика загрязнения вертикальных поверхностей фасадов зданий А и Б за 2018 г.

Значения величины слоя пыли к концу января и июля на поверхности фасада здания А, а также к концу сентября на обеих вертикальных поверхностях, равные нулю, свидетельствуют о способности зданий к самоочищению за счёт ветровых воздействий и атмосферных осадков (рисунок 4.4) [87–92,105]. Однако, несмотря на этот факт, на поверхности строительных объектов после отрыва частиц могут оставаться следы, связанные с природой происхождения, химическим составом и абразивностью пыли.

Значения величины слоя пыли на поверхности фасада здания А, где преобладают восточное, юго-восточное и южное направления ветра выше, чем на поверхности фасада здания Б, где преобладают западное, северо-западное и северное направления ветра. Наибольшее загрязнение обеих исследуемых вертикальных поверхностей наблюдается с мая по сентябрь, что объясняется природно–климатическими особенностями Волгограда. Расчётные значения величины слоя пыли на обеих вертикальных поверхностях фасадов зданий оказались выше данных натурных значений в течение всего периода наблюдений (рисунки 4.2–4.4).

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. Получены расчетные формулы для определения значения суммарного налипания пыли на исследуемые вертикальные поверхности (оштукатуренная, окрашенная, стеклянная, металлическая) для распределения Вейбулла, наиболее характерного для распределения скоростей ветра.

2. Получены расчётные формулы для определения изменения величины слоя пыли, вызванного отрывом её частиц с исследуемых вертикальных поверхностей (оштукатуренная, окрашенная, стеклянная, металлическая).

3. В результате проведенных теоретических расчётов налипания ААГС на вертикальные поверхности зданий и сооружений методом последовательного вычисления получены расчётные значения загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений.

4. Сравнение расчётных и натурных значений загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений показало, что расчётные значения выше натурных во всех рассматриваемых случаях: значения за месяц – не более, чем на 10%, значения за год – не более, чем на 7%.

## ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 5.1 Опыт использования теоретических и экспериментальных исследований загрязнения зданий и сооружений

В результате исследования загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, установлено, что наиболее значимыми из числа изученных случайных факторов являются скорость и направление воздушного потока к вертикальной поверхности. Исследование распределения повторяемости скоростей ветра освещено в п. 2.6. На основании экспериментальных исследований (пп. 3.3–3.7) доказано, что налипание пыли осуществляется в «зоне устойчивого налипания» при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $30^{\circ} \div 150^{\circ}$ . Процесс отрыва частиц с вертикальных поверхностей осуществляется в «зонах устойчивого отрыва» при направлениях воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $0^{\circ} \div 20^{\circ}$  и  $160^{\circ} \div 180^{\circ}$ . При значениях направлений воздушного потока к вертикальной поверхности, находящихся в диапазонах  $20^{\circ} \div 30^{\circ}$  и  $150^{\circ} \div 160^{\circ}$ , которые именуются «переходными зонами», происходит частичное налипание и отрыв частиц пыли. Рассмотрим возможные варианты направления ветра к вертикальной поверхности: направление ветра в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц с вертикальных поверхностей, шаг равен  $5^{\circ}$  (рисунки 5.1–5.3).



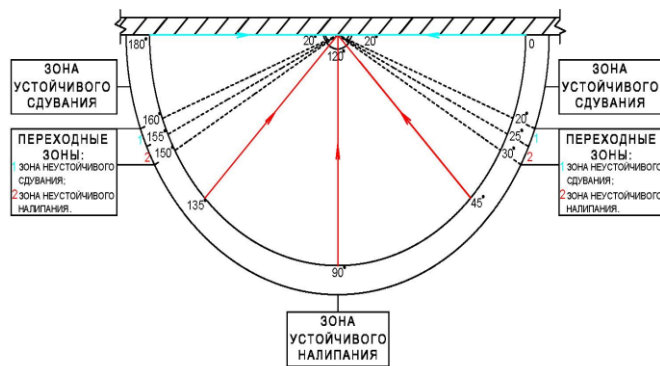


Рисунок 5.1 – Вариант направления ветра к вертикальной поверхности, при котором участвуют 3 направления ветра в «положительном» диапазоне и 2 направления ветра в «отрицательном» диапазоне

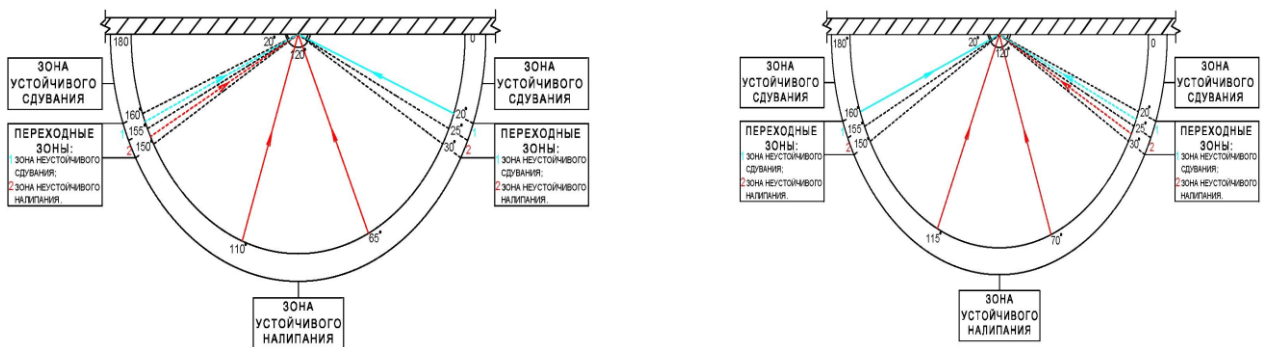


Рисунок 5.2 – Варианты направления ветра к вертикальной поверхности, при которых участвуют 2 направления ветра в «положительном» диапазоне и 1 направление ветра в «отрицательном» диапазоне

Основываясь на данных, полученных в результате экспериментальных исследований, установлено, что максимальные значения налипания городской пыли наблюдаются при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности под углом  $90^\circ$ , а максимальные значения отрыва частиц наблюдаются при направлении воздушного потока вдоль вертикальной поверхности (рисунок 5.1). В данном случае в адгезионном процессе участвуют 3 направления ветра в «положительном» диапазоне и 2 направления ветра в «отрицательном» диапазоне.

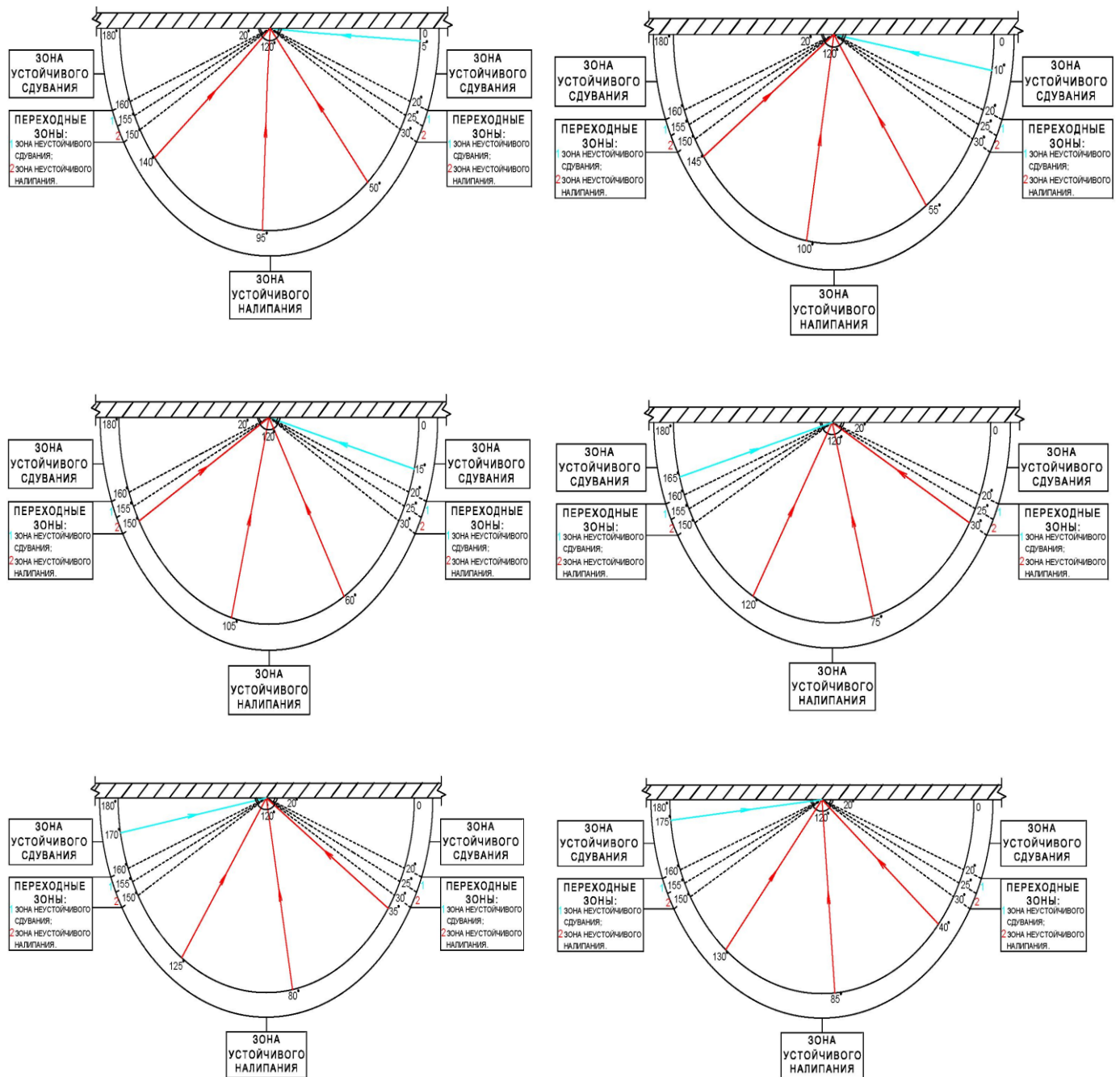


Рисунок 5.3 – Варианты направления ветра к вертикальной поверхности, при которых участвуют 3 направления ветра в «положительном» диапазоне и 1 направление ветра в «отрицательном» диапазоне

На рисунке 5.2 представлен вариант направления ветра к вертикальной поверхности, при котором в адгезионном процессе участвуют 2 направления ветра в

«положительном» диапазоне и 1 направление ветра в «отрицательном» диапазоне. В данном случае наблюдается наименьшее налипание пыли на вертикальные поверхности. На рисунке 5.3 представлены варианты направления ветра к вертикальной поверхности, при котором в адгезионном процессе участвуют 3 направления ветра в «положительном» диапазоне и 1 направление ветра в «отрицательном» диапазоне. В данном случае количество ветров, способствующих налипанию пыли на вертикальные поверхности, значительно превышает количество ветров, способствующих отрыву частиц с вертикальных поверхностей.

### **5.1.1 Апробация результатов теоретических и экспериментальных исследований налипания атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий**

В результате экспериментальных (пп. 3.3–3.4), а также теоретических (пп. 4.1, 4.1.1–4.1.3) исследований налипания атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий и сооружений получены расчетные формулы для определения значений суммарного налипания ААГС на наиболее характерные для городской среды вертикальные поверхности (оштукатуренная, окрашенная, стеклянная, металлическая поверхности), которые позволяют оценить степень запыления объекта. На основании теоретических формул расчёта суммарного налипания для стеклянной (4.20), оштукатуренной и окрашенной (4.23), металлической (4.26) поверхностей, получим значения величины слоя пыли, образовавшейся за год на исследуемых вертикальных поверхностях при условии отсутствия факторов, способствующих отрыву части с данных поверхностей, или способности здания к самоочищению, например, за счёт атмосферных осадков.

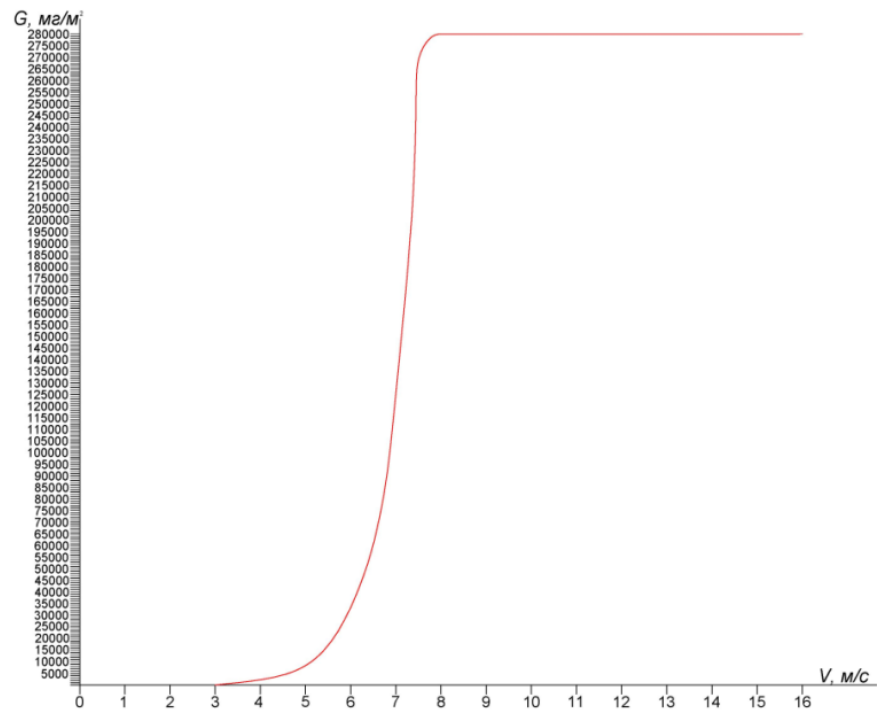


Рисунок 5.4 – График зависимости величины слоя пыли, налипшей на стеклянную вертикальную поверхность, от скорости ветра за год

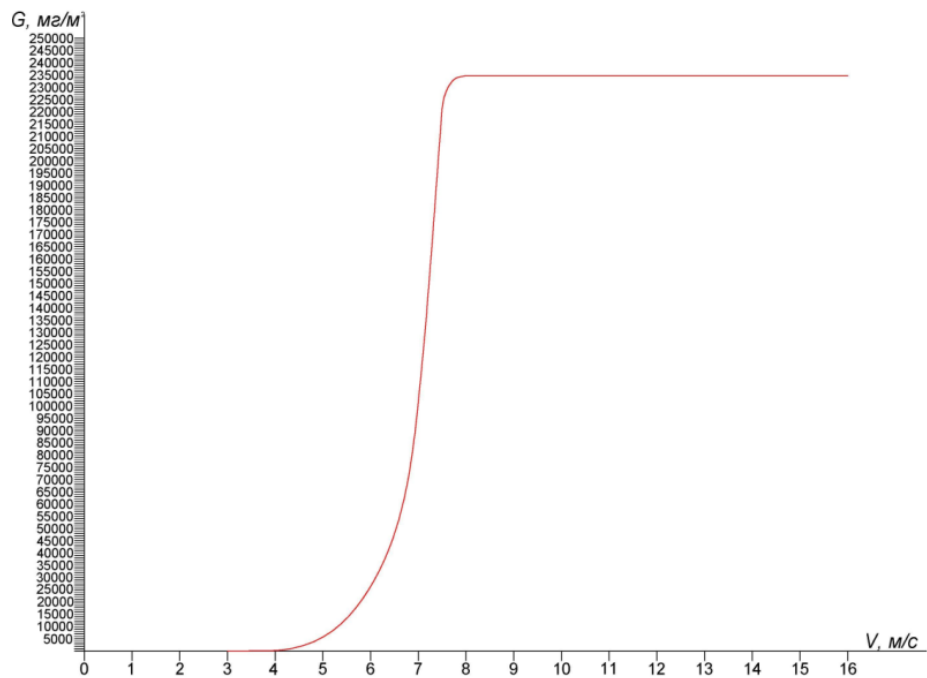


Рисунок 5.5 – График зависимости величины слоя пыли, налипшей на оштукатуренную и окрашенную вертикальные поверхности, от скорости ветра за год

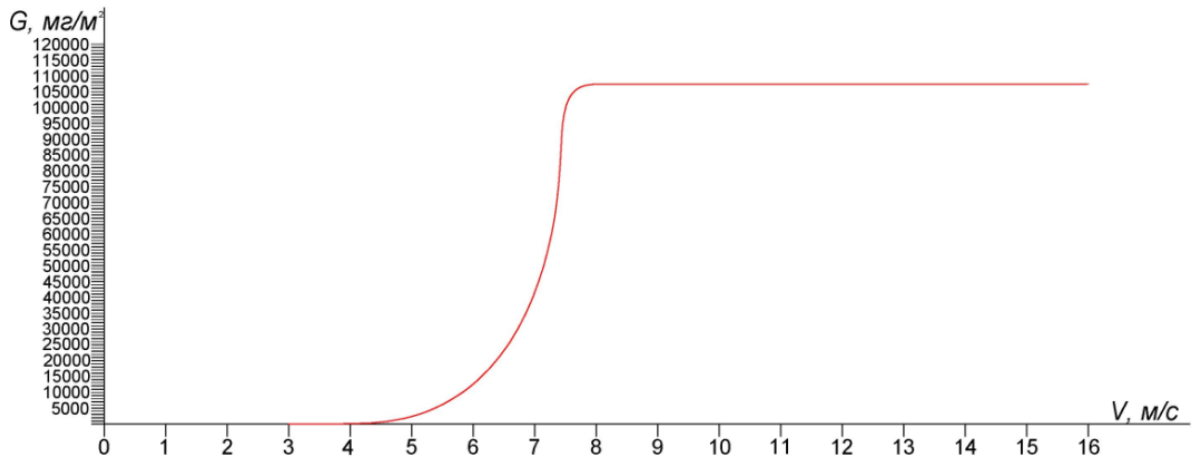


Рисунок 5.6 – График зависимости величины слоя пыли, налипшей на металлическую вертикальную поверхность, от скорости ветра за год

На рисунках 5.4–5.6 представлены расчётные зависимости налипания городской пыли на стеклянную, оштукатуренную и окрашенную, а также металлическую поверхности от скорости ветра за год. Наибольшее количество пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, за годовой период наблюдений зафиксировано на стеклянной вертикальной поверхности (рисунок 5.4). Величина слоя пыли на данной поверхности превышает аналогичные величины на 15% на оштукатуренной и окрашенной поверхностях (рисунок 5.5), а также на 60% на металлической поверхности (рисунок 5.6). Это объясняется особенностями взаимодействия мелкодисперсной пыли, характерной для городской среды, с гладкостью стеклянной поверхностью, соответствующей высшему классу чистоты поверхности [101], а также электрическими свойствами стекла [66]. Данные теоретических расчётов налипания пыли на стеклянную, оштукатуренную и окрашенную, а также металлическую вертикальные поверхности за 2018 год приведены в приложении Г.

### **5.1.2 Апробация результатов теоретических и экспериментальных исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальные поверхности зданий**

В результате экспериментальных (пп. 3.5–3.6), а также теоретических (пп. 4.2, 4.2.1–4.2.3) исследований отрыва частиц городской пыли с вертикальных поверхностей зданий и сооружений получены расчетные формулы для определения значений величины, характеризующей изменение толщины слоя пыли на наиболее характерных для городской среды вертикальных поверхностях (оштукатуренная, окрашенная, стеклянная, металлическая поверхности), которая также позволяет оценить степень запыления объекта. Наибольшей значимостью при данном процессе обладает величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальные поверхности зданий и сооружений, убывающая величина. На основании теоретических формул расчёта изменения величины слоя пыли, вызванного отрывом её частиц со стеклянной (4.42), оштукатуренной и окрашенной (4.32), металлической (4.49) поверхностей, получим изменённое в результате отрыва частиц значение величины слоя пыли на вышеупомянутых поверхностях. Так как разрешить уравнения, которые позволяют определить изменение величины слоя пыли, находящейся на стеклянной (4.42) и металлической (4.49) вертикальных поверхностях, не представляется возможным, то найдём решение данных уравнений графическим методом. Рассмотрим варианты отрыва частиц пыли с городских вертикальных поверхностей при разных режимах ветра.

На рисунке 5.7 представлена кривая, описывающая закономерность уменьшения первоначальной величины слоя пыли, равной  $G_0=100$  мг/м<sup>2</sup>, на стеклянной поверхности при скорости ветра  $V=4$  м/с и направлении ветра к вертикальной поверхности по углом 20°. При данном режиме ветра в первую очередь с

поверхности удалилось  $20 \text{ мг/м}^2$  пыли. Оставшаяся доля частиц полностью была удалена через 40 часов непрерывного отрыва частиц (1,67 дней).

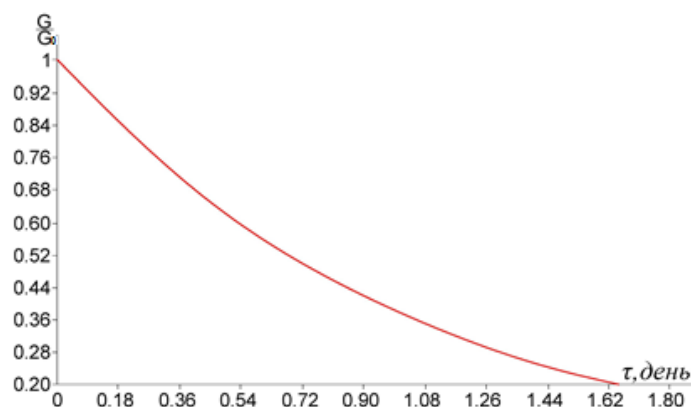


Рисунок 5.7 – График зависимости изменения величины слоя пыли, которая отрывается со стеклянной вертикальной поверхности от времени при  $V=4 \text{ м/с}$

На рисунке 5.8 представлен график, объясняющий закономерность уменьшения величины слоя пыли, равного  $G_0=100 \text{ мг/м}^2$ , на стеклянной поверхности при скорости ветра  $V=8 \text{ м/с}$  и направлении ветра вдоль вертикальной поверхности. При данном режиме ветра в первую очередь с поверхности удалилось  $80 \text{ мг/м}^2$  пыли. Оставшаяся доля частиц полностью была удалена через 6 часов непрерывного отрыва частиц (0,25 дней).

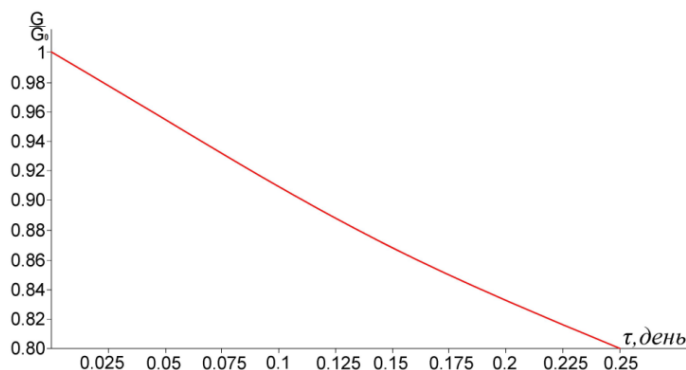


Рисунок 5.8 – График зависимости изменения величины слоя пыли, которая отрывается со стеклянной вертикальной поверхности от времени при  $V=8 \text{ м/с}$

Изображенный на рисунке 5.9 график описывает закономерность уменьшения величины слоя пыли, равного  $G_0=200 \text{ мг/м}^2$ , на металлической поверхности при скорости ветра  $V=8 \text{ м/с}$  и направлении ветра также вдоль вертикальной поверхности. При данном режиме ветра в первую очередь с поверхности удалилось  $120 \text{ мг/м}^2$  пыли. Оставшаяся доля частиц полностью была удалена через 15 часов непрерывного отрыва частиц (0,625 дней).

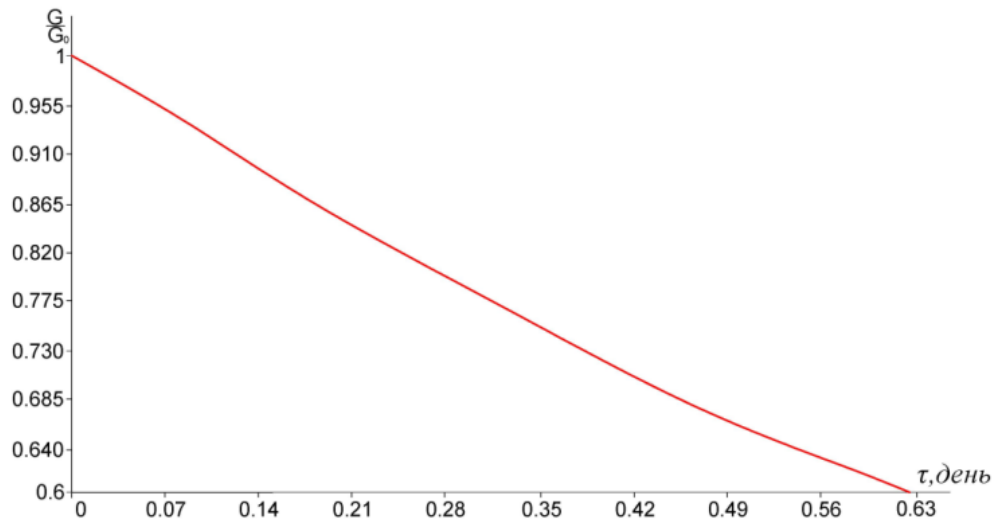


Рисунок 5.9 – График зависимости изменения величины слоя пыли, которая отрывается с металлической вертикальной поверхности от времени при  $V=8 \text{ м/с}$

На основании теоретических расчётов установлено, что уравнения, позволяющие определить изменение величины слоя пыли на стеклянной (4.42), оштукатуренной и окрашенной (4.32), металлической (4.49) поверхностях справедливы на небольших интервалах времени, где осуществляется исключительно процесс отрыва частиц, а также при известном значении начальной (предшествующей отрыву) величины слоя пыли на вертикальной поверхности.



## 5.2 Методики расчёта загрязнения зданий и сооружений

На основании теоретических и экспериментальных исследований адгезии (налипания и отрыва) частиц пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, автором разработаны 2 методики:

1. Методика расчёта текущего загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений городской среды;
2. Методика прогнозирования загрязнения зданий и сооружений.

**Методика расчёта текущего загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений городской среды** предназначена для существующих объектов, и характеризует их расчётное загрязнение на момент проведения обследования. Она основана на последовательном расчёте запыления сооружений, и заключается в пошаговом подсчёте воздействия ветров в «положительном» или «загрязняющем» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц пыли с вертикальных поверхностей, а также учитывает значения концентрации пыли в воздухе и ее дисперсный состав. Рассмотрим её более детально, разбив на следующие этапы:

1. Выбор временного периода исследований,  $\tau$ .
2. Определение воздействующих на здание ветров в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц пыли с вертикальных поверхностей, за счёт наложения схемы направления сторон света на обследуемое здание, и выбор одного из вариантов направления ветра к вертикальной поверхности, которые получены на основании результатов экспериментальных исследований (рисунки 5.1–5.3).

3. Сбор исходных данных о концентрации пыли в воздухе и её дисперсном составе, а также климатических данных – скорости и направления ветра за исследуемый период.

4. Сбор данных о начальном загрязнении здания (величина слоя пыли на вертикальной поверхности,  $\text{мг/м}^2$ . После ремонта или очистки фасада величина слоя пыли на поверхности  $G_0=0$ ). В данном случае осуществляется последовательный расчёт изменения величины слоя пыли на вертикальной поверхности, которая характеризует степень загрязнения здания.

5. Выбор расчётной формулы в зависимости от вида вертикальной поверхности и режимов ветра за исследуемый период. При налипании пыли на вертикальные поверхности: для стеклянной поверхности – (4.20), для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – (4.23), для металлической поверхности – (4.26). При отрыве частиц пыли с вертикальных поверхностей: для стеклянной поверхности – (4.42), для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – (4.32), для металлической поверхности – (4.49). Осуществление последовательного расчёта величины слоя пыли на вертикальной поверхности с учётом воздействующих на здание ветров в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц с вертикальных поверхностей. Таким образом, для любого здания на основании полученного значения  $G$ ,  $\text{мг/м}^2$  возможно оценить степень текущего загрязнения при помощи метода, освещенного в п. 5.5. На основании данной методики разработана программа, позволяющая вести учёт загрязнения зданий и сооружений, которая представлена в п. 5.3.

**Методика прогнозирования степени загрязнения зданий и сооружений** заключается в суммарном расчёте будущего загрязнения зданий и учитывает в среднем на основе многолетних наблюдений очередность воздействия ветров в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные

поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц пыли с вертикальных поверхностей. Рассмотрим её также более детально, разбив на следующие этапы:

1. Выбор периода исследования, на который осуществляется прогноз, т.
2. Определение воздействующих на здание ветров в «положительном» диапазоне, обозначающем налипание пыли на вертикальные поверхности, и «отрицательном» диапазоне, обозначающем отрыв частиц пыли с вертикальных поверхностей, за счёт наложения схемы направления сторон света на обследуемое здание, и выбор одного из вариантов направления ветра к вертикальной поверхности, которые получены на основании результатов экспериментальных исследований (рисунки 5.1–5.3).
3. Сбор исходных данных о концентрации пыли в воздухе и её дисперсном составе, а также климатических данных – скорости и направления ветра, полученных на основании анализа многолетних данных наблюдений.
4. Выбор расчётной формулы в зависимости от вида вертикальной поверхности и режимов ветра за исследуемый период. При налипании пыли на вертикальные поверхности: для стеклянной поверхности – (4.20), для оштукатуренной и окрашенной поверхностей – (4.23), для металлической поверхности – (4.26). При отрыве частиц пыли с вертикальных поверхностей – использовать расчётные формулы, которые содержатся в приложении Д. Осуществление суммарного расчёта (величины слоя пыли на вертикальной поверхности, вызванные налипанием или отрывом частиц за весь период исследований, рассчитываются отдельно и суммируются). Таким образом, для любого здания на основании полученного значения  $G$ ,  $\text{мг/м}^2$  возможно прогнозировать степень будущего загрязнения. На основании данной методики разработана программа, позволяющая прогнозировать степень загрязнения зданий и сооружений, которая представлена в п. 5.3.

Преимуществом методики оценки степени загрязнения зданий является её более высокая точность, т.к. она позволяет без натурных обследований рассчитать текущее

состояние здания при известных исходных экологических и климатических данных. Однако, она применима исключительно на небольшом временном интервале. Методика прогнозирования степени загрязнения зданий, в основе которой использовано распределение таких климатических данных, как скорость и направление ветра, обладает более низкой точностью, но применима на любых интервалах времени и позволяет прогнозировать загрязнения строительных объектов.

### **5.3 Программа для расчёта загрязнения зданий и сооружений**

Как было указано выше, на основании методик расчёта текущего загрязнения, а также прогнозирования степени загрязнения зданий и сооружений в будущем, которые представлены в п. 5.2, составлена программа, разработанная в соответствии с [38], блок-схема которой представлена на рисунках 5.10–5.11.

Работа данной программы основана на алгоритмах расчёта последовательного (рисунок 5.10) и суммарного (рисунок 5.11) загрязнения вертикальных поверхностей строительных объектов. Данная программа позволяет расчётным путём производить подсчёт загрязнения зданий и сооружений пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды.

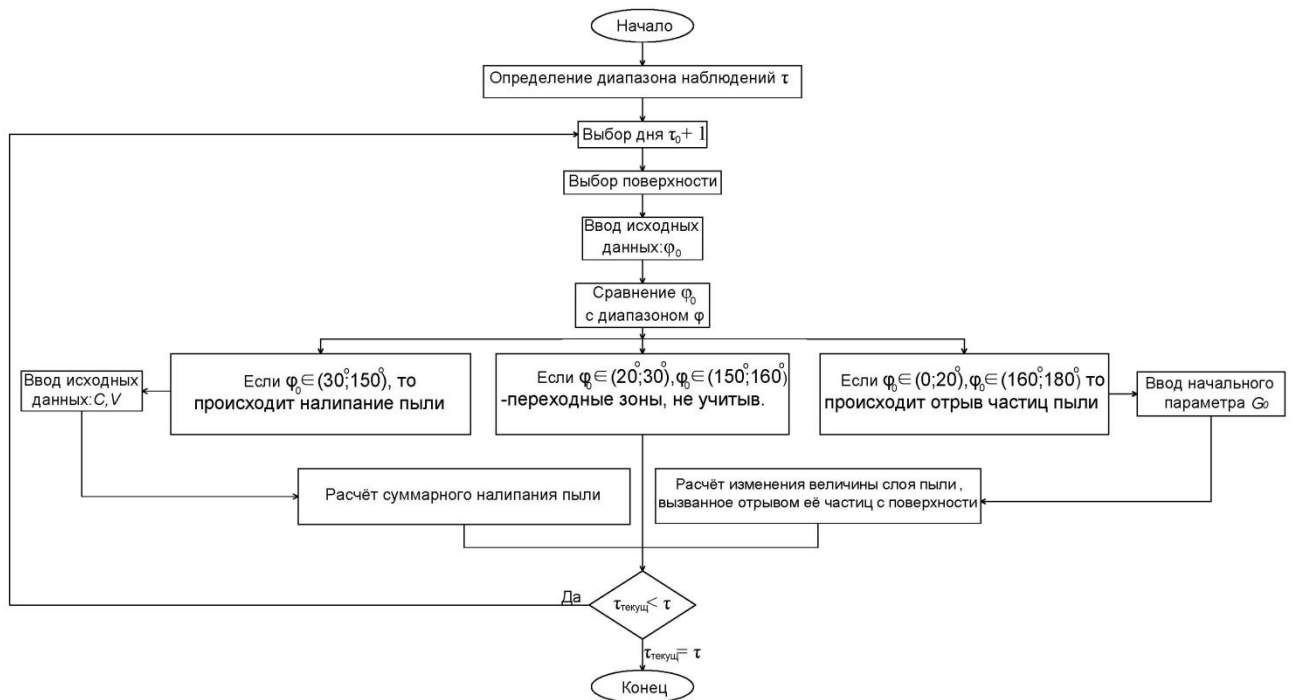


Рисунок 5.10 – Блок–схема программы при последовательном расчёте загрязнения зданий

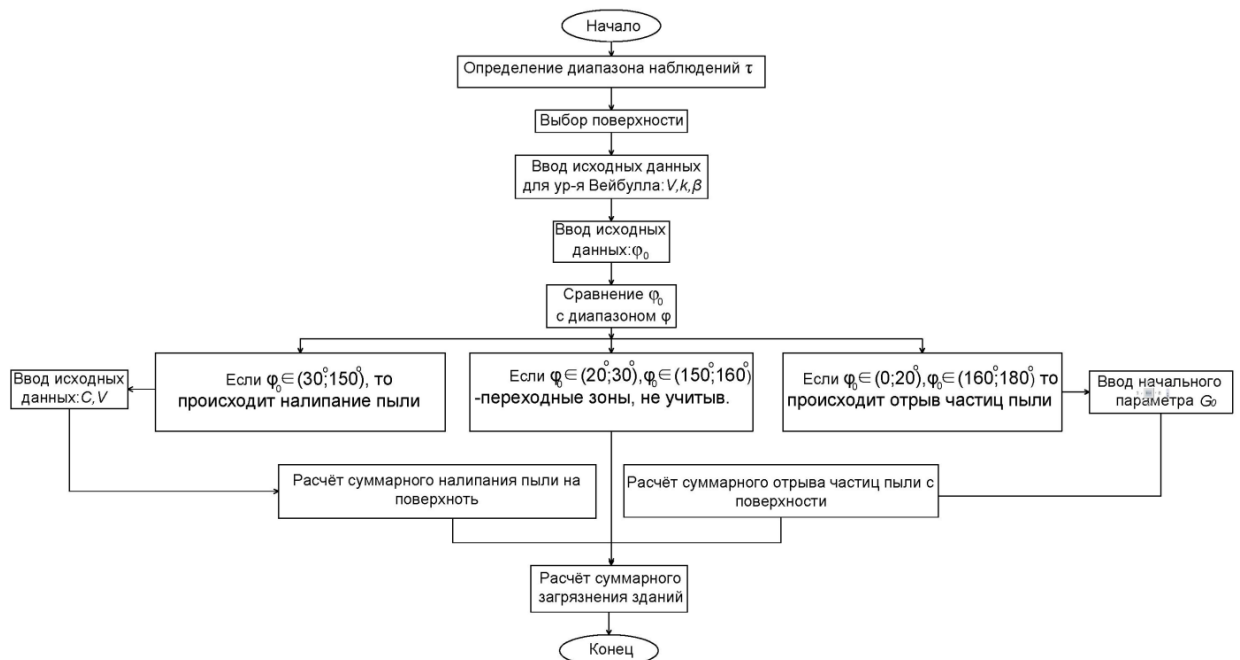


Рисунок 5.11 – Блок–схема программы при суммарном расчёте загрязнения зданий

#### **5.4 Опыт внедрения теоретических и экспериментальных исследований загрязнения зданий и сооружений**

Методика расчёта текущей, а также прогнозирования будущей степени загрязнения и периодичности очистки вертикальных поверхностей зданий и сооружений, представленная диссертационной работе на соискание учёной степени кандидата технических наук, апробирована в следующих организациях: ООО «НПО Волгоградохранкультура» при разработке разделов научно–проектной документации на проведение работ по сохранению объектов культурного наследия; ООО «Управление Фасадремонт Волгоградгоргражданстрой» при выполнении работ по капитальному ремонту фасадов жилых домов; ООО «Чистый мир» при проведении работ по очистке фасадов зданий. Результаты научно–исследовательской работы, позволяющие прогнозировать запыление воздушной городской среды, внедрены в ООО «Экотехмониторинг» при выполнении разделов проектов ОВОС и ПДВ (приложение А).

#### **5.5 Оценка степени загрязнения зданий и сооружений**

Для оценки степени загрязнения зданий и сооружений автор предлагает индивидуализировать шкалу (рисунок 1.5) [94,95] путём её адаптации к колористическому решению отдельного здания. Рассмотрим шкалу оценки внешнего вида зданий на примере цветового исполнения архитектурных объектов Царицына (конец XIX – начало XX веков) и Сталинского периода (середина 1930-х – конец 1950-х годов), представляющих собой чрезвычайный исторический и культурный

интерес. Данные сооружения расположены во многих районах г. Волгограда и чаще представлены в красном, бордовом, жёлтом, бежевом, сером и других цветах (рисунок 5.12) [19,107,108]. Далее на основании методик (п. 5.2) и программы (п. 5.3) для расчёта текущего загрязнения и прогнозирования ухудшения внешнего вида зданий, позволяющих получить численные значения величины их запылённости, а также исследований визуального аспекта, характеризующего зрительное восприятие человеком фасадов сооружений, возможно оценить степень загрязнения строительных объектов за счёт изучения в совокупности вышеизложенных положений.

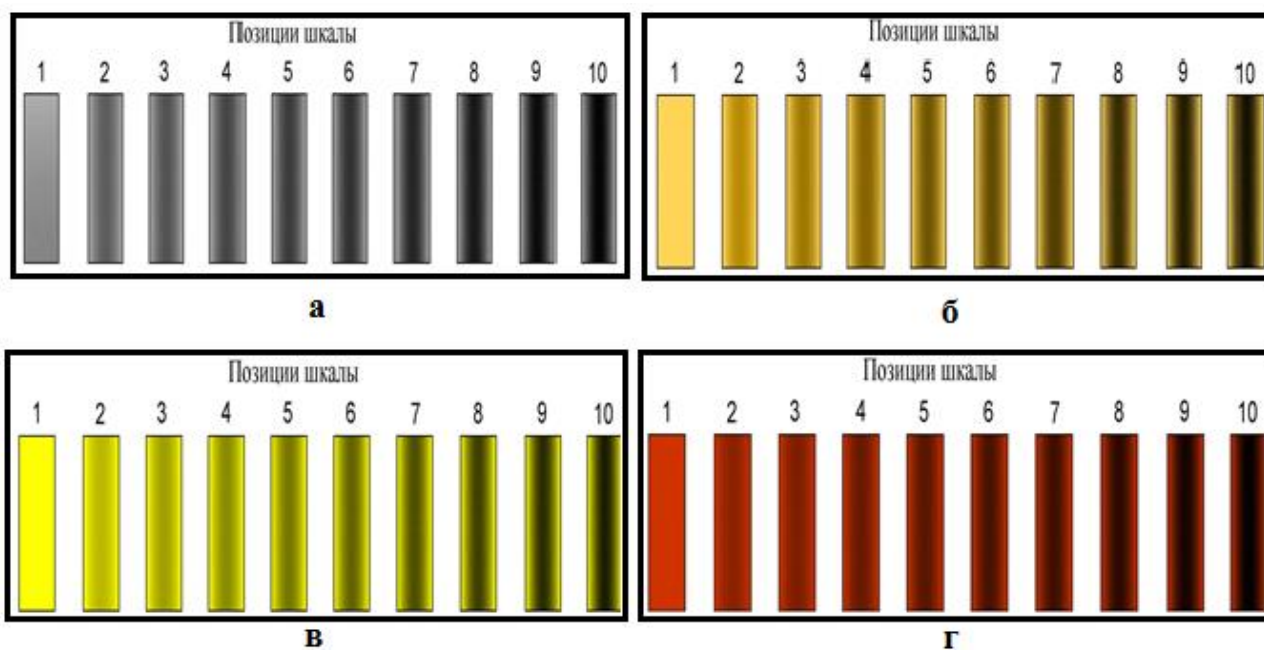


Рисунок 5.12 – Шкала оценки внешнего вида зданий: а–для объектов серого цвета;  
б–для объектов бежевого цвета; в–для объектов желтого цвета;  
г–для объектов бордового цвета

Проведены многочисленные исследования внешнего облика зданий, расположенных в зоне примагистральных территорий во многих районах г. Волгограда. На основании сравнения фасадов строительных конструкций со шкалой

оценки их внешнего вида (рисунок 5.12), а также расчётных значений запылённости вертикальных поверхностей, произведена оценка их состояния, благодаря которой устанавливается периодичность очистки зданий. На рисунке 5.13 представлены фотографии фасадов зданий, соответствующие позициям шкалы (рисунок 5.12) №№ 1–5. Напомним, основываясь на [94,95], если внешний вид вертикальной поверхности соответствует данным позициям шкалы, то здание считается приемлемо чистым, а после очистки фасада его визуальный облик не должен превышать позицию шкалы № 3. В таблице 5.1 приведены значения загрязнения вертикальных поверхностей зданий, соответствующие позициям шкалы №№ 1–5. На рисунке 5.14 представлены фотографии фасадов зданий, соответствующие позициям шкалы (рисунок 5.12) №№ 6–10. В таблице 5.2 приведены соответствующие данным позициям шкалы значения загрязнения вертикальных поверхностей зданий.

Таблица 5.1 – Значения загрязнений фасадов зданий для позиций шкалы №№ 1–5

№ позиции шкалы	Величина загрязнения $G$ , мг/м <sup>2</sup>	Площадь загрязнения от общей площади поверхности, %
1	менее 1000	менее 20
2	не более 2000	не более 30
3	не более 4000	не более 35
4	не более 6000	не более 40
5	не более 8000	не более 45



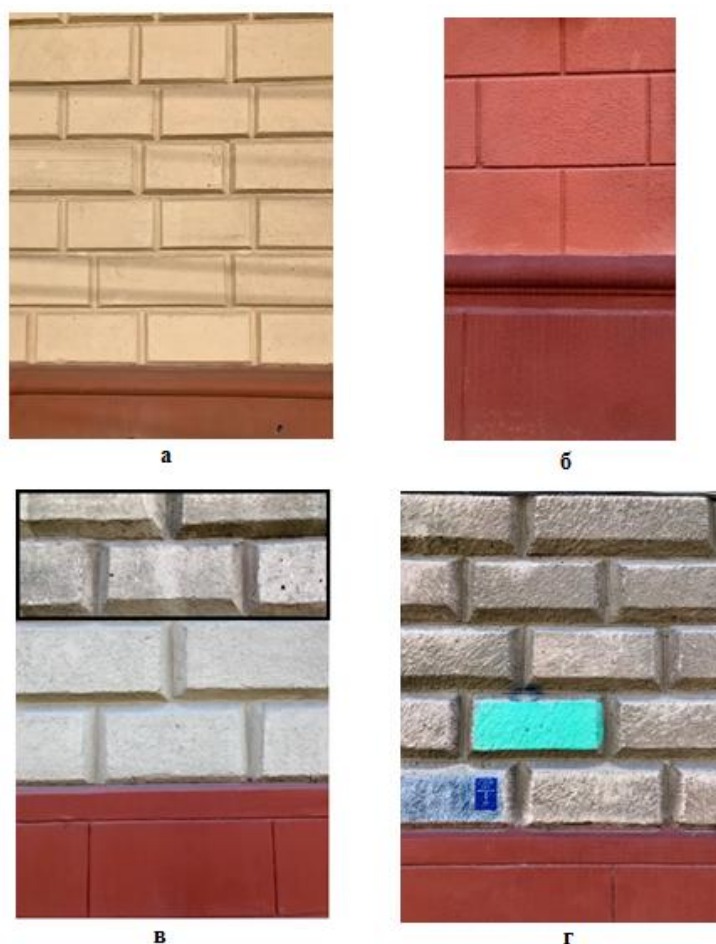


Рисунок 5.13 – Оценка загрязнения зданий: а – величина загрязнения не превышает №№1–2 шкалы; б – величина загрязнения не превышает №3 шкалы; в – величина загрязнения не превышает №4 шкалы (верхняя часть); г – величина загрязнения не превышает №5 шкалы

Таблица 5.2 –Значения загрязнений фасадов зданий для позиций шкалы №№ 6–10

№ позиции шкалы	Величина загрязнения $G$ , мг/м <sup>2</sup>	Площадь загрязнения от общей площади поверхности, %
6	менее 10000	не более 55
7	не более 20000	не более 60
8	не более 3000	не более 70
9	не более 4000	не более 73
10	более 50000	более 75

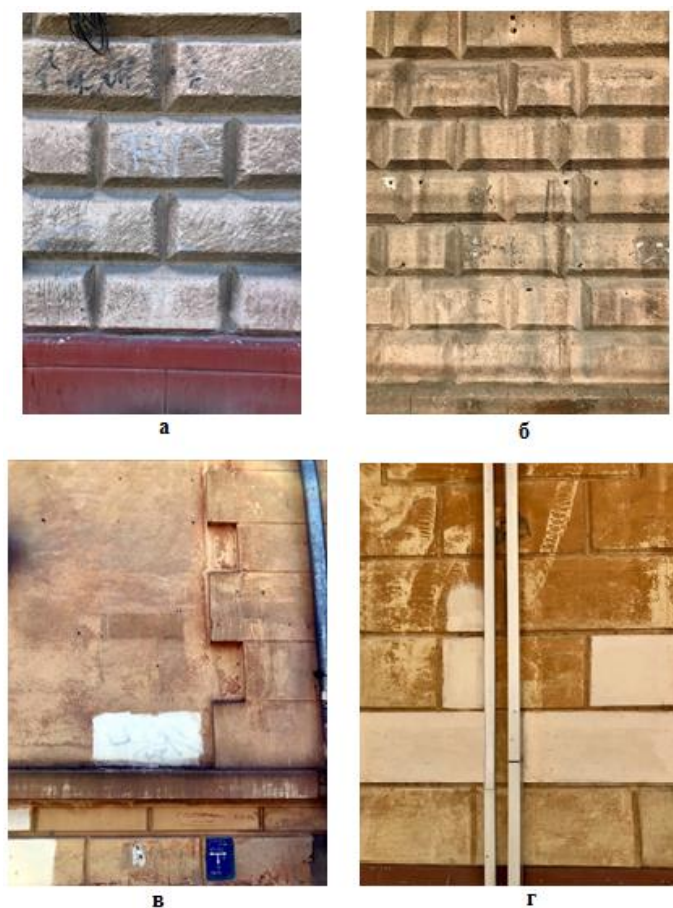


Рисунок 5.14 – Оценка загрязнения зданий: а – величина загрязнения не превышает №6 шкалы; б – величина загрязнения не превышает №7 шкалы; в – величина загрязнения не превышает №8 шкалы; г – величина загрязнения не превышает №№9–10 шкалы

Загрязнение зданий и сооружений атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС) является изменчивой величиной, т.к. в результате взаимодействия пыли с вертикальными поверхностями при участии ветра, способствующего налипанию или отрыву частиц пыли на вертикальных поверхностях, толщина её слоя на поверхности не постоянна. Более того, после отрыва частиц пыли с вертикальной поверхности, ранее занимаемая частицей площадь данной поверхности может изменять свой цвет в связи с их взаимодействием. Таким образом, возможно оценить степень загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений, а также

установить периодичность их очистки. Для регионов с невысоким уровнем влажности воздуха, например, г. Волгограда, на основании представленных в п. 5.2 расчётных методик, срок эксплуатации строительных конструкций до ремонта их фасадов в сравнении с данными, представленными в [32,48,94,95], может быть увеличен.

### **5.6 Закономерности загрязнения зданий и сооружений в зависимости от их местоположения**

На основании методики учета межрайонного переноса пыли (вредностей) [5,8,9,46] возможно выявить закономерности загрязнения зданий и сооружений, расположенных в различных районах г. Волгограда. Наибольшую удельную нагрузку загрязнений на атмосферный воздух и, как следствие, наибольшую подверженность воздействию загрязнений испытывают вертикальные поверхности зданий, расположенных в таких районах, как Центральный, Ворошиловский, Краснооктябрьский и Тракторозаводский (рисунок 5.15) [46]. В данных районах города расположено большинство архитектурных объектов Царицына и Сталинского периода, которые представляют собой исторический и культурный интерес. В п. 4.3 рассмотрены закономерности загрязнения атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС) здания, расположенные в Центральном районе г. Волгограда вдоль одной из основных автодорог – 1-ой Продольной магистрали.



### Условные обозначения:





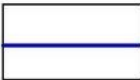

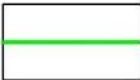


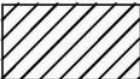
	Центральный район		Советский район
	Краснооктябрьский район		Кировский район
	Тракторозаводский район		Красноармейский район
	Ворошиловский район		Дзержинский район
	Максимальная удельная нагрузка загрязнения на атмосферу		Средняя удельная нагрузка загрязнения на атмосферу

Рисунок 5.15 – Удельная нагрузка загрязнения на атмосферный воздух районов г. Волгограда

## 5.7 Выводы по главе 5

1. Установлено, что при скоростях ветра, находящихся в диапазоне 8–16 м/с, наблюдаются одинаковые закономерности налипания пыли на всех исследуемых вертикальных поверхностях.

2. Уравнения, позволяющие определить изменение величины слоя пыли, которое вызвано отрывом её частиц с исследуемых вертикальных поверхностей, справедливы на небольших интервалах времени, где осуществляется исключительно процесс отрыва частиц пыли, а также при известном значении предшествующей отрыву частиц величины слоя пыли на вертикальной поверхности.

3. Подготовлены две методики и программа для расчёта текущего загрязнения, а также прогнозирования будущего загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в городской среде.

4. Исследуя в совокупности физический и визуальный аспекты загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений, возможно произвести оценку степени ухудшения внешнего облика фасадов строительных объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию закономерностей загрязнения вертикальных поверхностей зданий и сооружений содержащимся в воздухе атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС). На основании результатов проведенных теоретических, экспериментальных и натурных исследований можно сделать основные выводы по работе:

1. В результате анализа литературных источников установлено, что вопросы, связанные с адгезией (налипанием и отрывом) частиц ААГС на вертикальных поверхностях зданий и сооружений, являются недостаточно изученными. Так как дисперсный состав ААГС не подчиняется логарифмически–нормальному закону распределения, использованному Зимоном А.Д. для характеристики процесса адгезии стеклянной пыли по числу адгезии, то применение зависимостей для расчёта числа адгезии ААГС требует проведения экспериментальных исследований. По аналогии с Зимоном А.Д. будем понимать под числом адгезии массовую долю от налипших ранее частиц, которые остались на поверхности после воздействия на неё внешних сил. Доказано, что дисперсный состав ААГС подчиняется усечённому логарифмически–нормальному закону распределения.

2. На основании экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости налипания и отрыва частиц ААГС на оштукатуренной, окрашенной, стеклянной и металлической вертикальных поверхностях от таких факторов, как концентрация пыли в воздушном потоке, максимальный размер частиц, скорость и направление воздушного потока к вертикальной поверхности, величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальные поверхности ( $\text{мг/м}^2$ ). План экспериментальных исследований представляет собой матрицу планирования, которая соответствует центральному композиционному рототабельному плану

(ЦКРП). Значимость коэффициентов регрессионных зависимостей определялась по критерию Стьюдента, адекватность математической модели – по критерию Фишера, воспроизводимость результатов проводилась при помощи критерия Кохрена. Установлено, что при экспериментальных исследованиях налипания и отрыва частиц ААГС наиболее значимыми являются такие климатические факторы, как скорость и направление воздушного потока к вертикальной поверхности. При отрыве частиц ААГС, кроме данных факторов, особую значимость имеет величина ранее налипшего слоя пыли на вертикальных поверхностях.

3. Экспериментально доказано, что запыление вертикальных поверхностей городской среды осуществляется в «зоне устойчивого налипания» при направлении воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазоне  $30^{\circ}\div 150^{\circ}$ , а отрыв частиц ААГС с вертикальных поверхностей осуществляется «зонах устойчивого отрыва» при направлениях воздушного потока к вертикальной поверхности в диапазонах  $0\div 20^{\circ}$  и  $160^{\circ}\div 180^{\circ}$ .

4. Получены расчётные формулы для определения значения годового загрязнения пылью наиболее характерных для городской среды вертикальных поверхностей: окрашенной, оштукатуренной, стеклянной, металлической.

5. Разработаны методики расчёта текущего и прогнозирования будущего загрязнения пылью вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в городской среде. Сравнение натурных и расчётных значений толщины слоя пыли на городских вертикальных поверхностях показало, что расчётные значения выше натурных, в том числе значения за месяц – не более, чем на 10%, значения за год – не более, чем на 7%.

6. На основании методик расчёта текущего загрязнения, а также прогнозирования загрязнения зданий и сооружений в будущем разработана программа, работа которой основана на алгоритмах расчёта последовательного и суммарного загрязнения вертикальных поверхностей строительных объектов.

7. Исследование в совокупности физического и визуального аспектов загрязнения зданий и сооружений позволяет произвести оценку степени ухудшения внешнего облика фасадов строительных объектов.

8. Методика расчёта текущего загрязнения, прогнозирования загрязнения зданий и сооружений в будущем, а также периодичности очистки их вертикальных поверхностей апробирована в следующих организациях: ООО «НПО Волгоградохранкультура» при разработке разделов научно–проектной документации на проведение работ по сохранению объектов культурного наследия; ООО «Управление Фасадремонт Волгоградгоргражданстрой» при выполнении работ по капитальному ремонту фасадов жилых домов г. Волгограда; ООО «Чистый мир» при проведении работ по очистке фасадов зданий. Методика, позволяющая прогнозировать запыление воздушной городской среды, внедрена в ООО «Экотехмониторинг» при выполнении разделов проектов ОВОС и ПДВ.

**В работе приведены практические рекомендации** для сохранения внешнего облика зданий и сооружений, расположенных в городской среде, на основании которых возможно рассчитать текущее и прогнозировать будущее загрязнение строительных объектов городским атмосферным аэрозолем.

**Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации** заключаются в уточнении расчётных зависимостей загрязнения строительных объектов пылью, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, а именно в расширении спектра исследуемых поверхностей фасадов зданий, сооружений и памятников архитектуры (их форм, свойств строительных и отделочных материалов, из которых они выполнены, климатических параметров, связанных с их местоположением), а также в уточнении методик расчёта текущего, прогнозирования будущего загрязнения строительных конструкций, оценки степени ухудшения их внешнего облика, позволяющих сделать заключение о периодичности очистки их фасадов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамовиц, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами [Текст] / М. Абрамовиц, И. Стиган // Пер. с англ.– Москва: Наука, 1979.– 832 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // Москва: Наука, 1976.– 280 с.
3. Азаров, В. Н. Анализ существующих методик расчета массы выбросов и концентрации пыли в атмосферном воздухе для источников предприятий стройиндустрии [Текст] / В. Н. Азаров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы Междунар. науч. конф. 25–29 сент. 2002 г., Волгоград.– Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 2002.– С. 3–7.
4. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий [Текст] // автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Азаров Валерий Николаевич.– Ростов-на-Дону, 2004.– 46 с.
5. Азаров, В. Н. Концепции биосферной совместимости и экологического следа и их роль в достижении экологически устойчивого развития урбанизированных территорий [Текст] / В. Н. Азаров, Т. В. Донцова // Социология города.– 2013.– №1.– С. 39–45.
6. Азаров, В. Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) [Текст] / В.Н. Азаров Н.М., Сергина // Деп. в ВИНТИ. № 1332- 80002. 15.07.2002.
7. Азаров, В. Н. О дисперсном составе пыли в системах обеспыливающей вентиляции строительных производств [Текст] / В.Н. Азаров, Е.Ю. Есина // Вестн.

Волгогр. гос. архит.–строит. ун–та. Сер.: Стр–во и архитектура.– 2008.– № 11.– С. 119–122.

8. Азаров, В. Н. О законе распределения среднебалансовой концентрации загрязняющих веществ в атмосфере районов мегаполиса [Текст] / В. Н. Азаров, Т. В. Донцова, Д. С. Хегай // Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах».– Брянск, 2015.– Т. 2.– С. 7–10.

9. Азаров, В. Н. Основы балансового метода оценки поступления вредных веществ в район крупного города в рамках концепции биосферной совместимости [Текст] / В. Н. Азаров, Т. В. Донцова, Д. С. Хегай // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии.– 2015.– № 4.– С. 10–19.

10. Азаров, В.Н. Дисперсный состав пыли как случайная функция [Текст] / В.Н. Азаров, Д.В. Азаров, А.Б. Гробов // Объединенный научный журнал.– 2003.– № 6.– С. 62–64.

11. Азаров, В.Н. Загрязненность строительных конструкций и памятников архитектуры как один из аспектов визуальной экологии [Текст] / В.Н. Азаров, А.А. Кузьмичев // Социология города, 2015.– №2.– С.76–86.

12. Азаров, В.Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) [Текст] / В.Н. Азаров, В.Ю. Юркъян, Н.М. Сергина, А.В. Ковалева // Законодательная и прикладная метрология.– 2004.– № 1.– С. 46–48.

13. Азаров, В.Н. Нормирование PM10 и PM2,5 как социальных стандартов качества в районах расположения предприятий стройиндустрии [Текст] / В.Н. Азаров, И.В. Тertiшников, Н.А. Маринин // Жилищ. стр–во.– 2012.– № 3.– С. 20–22.

14. Азаров, В.Н. О методике и оценке комплексных показателей экологической безопасности и устойчивости региона [Текст] / В.Н. Азаров, В. Г. Поляков, Н. С. Кузнецова // Объединенный науч. журн.– 2005.– № 2.– С. 68–71.
15. Азаров, В.Н. О нормировании качества воздуха рабочей зоны [Текст] / В.Н. Азаров, О.К. Барсуков, А.Г. Круглов // Вестн. Волгогр. гос. архит.–строит. ун–та. Сер.: Стр–во и архитектура.– 2009.– № 16.– С. 162–165.
16. Азаров, В.Н. Об оценке концентрации мелкодисперсной пыли ( $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ ) в атмосфере городов [Текст] / В.Н. Азаров, Н.А. Маринин, Д.В. Жоголева // Изв. Юго–Запад. гос. ун–та.– 2011.– № 5, ч. 2.– С. 144–148.
17. Азаров, В.Н. Планирование и обработка эксперимента экологических исследований: учебно-практическое пособие [Текст] / В.Н. Азаров, Т.В. Ерещенко, Т.В. Соловьева // М-во образования и науки Рос. Федерации.– Волгоград: ВолгГТУ, 2018.– 82 с.
18. Азаров, В.Н. Расчет интегрального массового коэффициента адгезии городской пыли на вертикальные поверхности зданий [Текст] / В.Н. Азаров, А.А. Кузьмичев, Т.В. Соловьева // Строительство и техногенная безопасность.– 2018.– № 11(63).– С. 39–46.
19. Азаров, В.Н. Совокупность физического и визуального аспектов при исследовании загрязнений строительных конструкций и памятников архитектуры [Текст] / В.Н. Азаров, А.А. Кузьмичев // Социология города, 2016. №3.– С.28–42.
20. Азгальдов, Г.Г. Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании [Текст] / Г.Г. Азгальдов // М.: Стройиздат, 1989.–272с.
21. Андреева, И.С. Аэрозоли Сибири [Текст] / И. С. Андреева и др. // отв. ред. К.П. Куценогий; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т химической кинетики и горения [и др.].– Новосибирск: Изд–во СО РАН, 2006.– 548 с.– (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 9).

22. Астапенко, П. Д. Вопросы о погоде [Текст] / П.Д. Астапенко // Ленинград: Гидрометеиздат, 1986.– С. 293–294.
23. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст]: учеб. пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров // Москва: Высшая школа, 1985.– 327 с.
24. Балалаев, Г.А. Защита строительных конструкций от коррозии [Текст] / Г.А. Балалаев, В.М. Медведев, Н.А. Мощанский // Москва: Изд-во Стройиздат, 1966.– 224 с.
25. Барикаева, Н. С. Совершенствование системы мониторинга загрязнения воздуха придорожных территорий городов мелкодисперсной пылью [Текст] // дис. ... канд. техн. наук: 05.23.19 / Барикаева Н. С.– Волгоград, 2017.– 159 с.
26. Белов, П. Н. Численные методы прогноза погоды [Текст] / П. Н. Белов, Е. П. Борисенков, Б. Д. Панин // Ленинград: Гидрометеиздат, 1989.– 376 с.
27. Бойко, М.Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений [Текст] / под ред. М.Д. Бойко // Санкт-Петербург: Изд-во Стройиздат, 1986.– 256 с.
28. Боровиков, А. В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / А. В. Боровиков // Санкт-Петербург : Изд. дом «Питер», 2001 – 656 с.
29. Буреева, Н. Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП STATISTICA [Текст] / Н. Н. Буреева // Нижний Новгород, 2007.– 112 с.
30. Величковский, Б. Т. Фиброгенные пыли. Особенности строения и механизма биологического действия [Текст] / Б. Т. Величковский // Горький: Волго-Вятское книж. изд-во, 1980.– 160 с.
31. Ветошкин, А. Г. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы) [Текст]: учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, К. Р. Таранцева // Пенза: Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004.– 249 с.

32. ВСН 58-88(р). Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения [Текст].– Москва: Стройиздат, 1990.

33. ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» [Текст].– Москва: Стандартинформ, 2017.

34. Голдаев, С. В. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Вейбулла–Гнеденко [Текст] / С. В. Голдаев, К. Н. Радюк // Материалы двадцатой Всероссийской научно–технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность».– Томск: Изд–во ТПУ, 2014.– С. 127–130.

35. Городков А.В., Федосова С. И. Программы и направления научных исследований регионального центра «Экология визуальной среды» при кафедре природообустройства БГИТА [Электронный ресурс] // URL: [http://science-bsea.narod.ru/2006/les\\_2006/gorodkov\\_program.htm](http://science-bsea.narod.ru/2006/les_2006/gorodkov_program.htm) (дата обращения 20.12.15).

36. Городков, А.В. Экология визуальной среды : учебное пособие для вузов [Текст] / А.В. Городков, С.И. Салтанова // 2-е изд., перераб. и доп.– СПб.: Лань, 2013.– 192 с.

37. ГОСТ 12.4.041-2001 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Общие технические требования [Текст].– Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003.

38. ГОСТ 19.701-90 Схемы алгоритмов программ, данных и систем [Текст].– Москва: Стандартинформ, 2010.– 24 с.

39. ГОСТ Р 56929-2016. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха [Текст].– Москва: Стандартинформ, 2016.

40. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году».— Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2010.
41. Грин, Х. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы [Текст]: моногр. / Х. Грин, В. Лейн // Москва: Изд-во Химия, 1972.— 427 с.
42. Груза, Г. В. Вероятностные метеорологические прогнозы [Текст] / Г.В. Груза, Э. Я. Ранькова // Ленинград: Гидрометеиздат, 1983.— 271 с.
43. Гуревич, Э.А. Химическая стойкость строительных материалов [Текст]: учеб. пособ. / Э.А. Гуревич // Саратов.— СПИ, 1980.— 80 с.
44. Гуревич, Э.А. Химическое сопротивление строительных материалов [Текст]: учеб. пособ. / Э.А. Гуревич // Саратов.— СГТУ, 2003.— 52 с.
45. Дерягин, Б.В. Адгезия твердых тел [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга // М.: Наука, 1973.— 280 с.
46. Донцова, Т.В. Балансовый метод оценки загрязнения воздушной среды крупных городов на принципах биосферной совместимости [Текст]: дисс. к-та техн. наук / Донцова Татьяна Васильевна.— Волгоград, 2016.— 161 с.
47. Ельчищева, Т.Ф. Оценка влияния качества воздушного бассейна в г. Тамбове на наружные ограждающие конструкции зданий [Текст] / Т.Ф. Ельчищева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии.— 2014.— № 3(7).— С. 43–49.
48. ЖНМ-2007/03 Норматив города Москвы Содержание и ремонт фасадов зданий и сооружений [Текст].— Правительство Москвы, 2007.
49. Жук, П.М. Обеспечение сохранности памятников архитектуры на основе экологической оценки биоповреждений [Текст] // автореф. дис....канд. техн. наук / Жук Петр Михайлович.— Москва, 2002.— 25 с.
50. Жуков, Е. В. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: Учебник для вузов [Текст] / Е. В. Жуков, В. И. Онегин // Москва: Экология, 1993.— 304 с.

51. Зимон А.Д. Что такое адгезия [Текст]/ А.Д. Зимон // Москва: Наука, 1983.– 176 с.
52. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков [Текст] / А. Д. Зимон // Изд. 2-е, пер. и доп.– Москва: Химия, 1976.– 431 с.
53. Зимон, А.Д. [Текст] / А.Д. Зимон, Б.В. Дерягин // Коллоидн. ж.– 1963.– Т.25.– № 2.– С. 159–164.
54. Зимон, А.Д. [Текст] / А.Д. Зимон, Г.А. Серебряков // Коллоидн. ж.– 1973.– Т.35.– №1.– С.26–33.
55. Зимон, А.Д. [Текст] / А.Д. Зимон, Т.С. Волкова // Коллоидн. ж.– 1965.– Т.27.– № 4.– С. 529–533.
56. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков [Текст] / А.Д. Зимон // Москва: Химия, 1967.– 372 с.
57. Ильин, В.А. Математический анализ. Продолжение курса [Текст] / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Бл. Х. Сендов // Под ред. А. Н. Тихонова.– М.: Изд-во МГУ, 1987.– 358 с.
58. Казаков, Ю. Б. Методы планирования эксперимента [Текст] / Ю. Б. Казаков // Москва: Энергия, 1971. – С. 73-78.
59. Казаков, Ю.Б. Методы планирования эксперимента в электромеханике: Метод. указания к выполнению лаб. работ [Текст] / Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов // Иванов. гос. энергетический ун-т.- Иваново, 2001.– 28 с.
60. Калинин, В.М. Оценка технического состояния зданий [Текст] / под ред. В.М. Калинина, С.Д. Соковой // Москва: Изд-во Инфра-М, 2013.– 272 с.
61. Климат Волгограда [Текст] / Сев.-Кавк. террит. упр. по гидрометеорологии, Ниж.-Волж. гидрометеорол. обсерватория (под редакцией Ц. А. Швер). – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989.– 215 с.

62. Колмогоров, А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении [Текст] / А. Н. Колмогоров // «Докл. АН СССР», 1941.– Т. 31.– В. 2.– С. 99–101.

63. Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Женева, 1972 (вступила в силу в СССР 16.03.1983).

64. Константинов, В. Н. Выбор ветроэнергетической установки и оценка ее производительности [Текст] / В. Н. Константинов, Р. С. Абдрахманов // Изв. вузов. Проблемы энергетики.– 2005.– № 11/12.– С. 48–52.

65. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 года № 1662-р.

66. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам [Текст] / Под редакцией Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева.// Том 2, 3-е изд.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 464 с.

67. Кузьмичев, А.А. Исследование влияния загрязнения атмосферного воздуха на внешний облик и восприятие строительных конструкций и памятников архитектуры [Текст] / А.А. Кузьмичев, В.Н. Азаров // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии.– 2016.– № 1.– С. 86–96.

68. Кузьмичев, А.А. Исследование закономерностей загрязнения строительных конструкций с помощью методов компьютерного моделирования [Текст] / А.А. Кузьмичев, В.Н. Азаров // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура.– 2017.– № 50 (69).– С. 440–450.

69. Кузьмичев, А.А. Методы создания комфортной визуальной среды города при реконструкции исторических зданий и сооружений [Текст] / А.А. Кузьмичев, В.Н. Азаров // Социология города.– 2017.– № 2.– С. 44–52.



70. Кузьмичев, А.А. Характеристика внешних и внутренних атмосферных загрязнений, воздействующих на объекты культурного наследия [Текст] / А.А. Кузьмичев // Современные научные исследования и разработки.– 2017.– № 5(13).– С. 187–190.

71. Научно-прикладной справочник по климату СССР [Текст]. Вып. 13. Волгоградская, Ростовская, Астраханская области, Краснодарский, Ставропольский края, Калмыцкая, Кабардино–Балкарская, Чечено-Ингушская, Северо–Осетинская АССР.– Ленинград : Гидрометеиздат.– 1990.– 724 с.

72. Нечаев, Д.Ю. Надежность информационных систем [Текст] / Д.Ю. Нечаев, Ю.В. Чекмарев // ДМК–Пресс, 2012.– С.64.

73. Очистка фасадов. Методы и средства для чистки фасадов [Электронный ресурс] // URL: <http://www.vashdom.ru/articles/fasad.htm> (дата обращения 20.12.17).

74. Приказ комитета государственной охраны объектов культурного наследия Волгоградской области от 22.11.17 № 174 «Об утверждении границ зон охраны объекта культурного наследия регионального значения «Здание гидромелиоративного колледжа», 1958 г., расположенного по адресу: г. Волгоград, Центральный район, пр. Ленина, 38, а также требований к режимам использования земель и градостроительным регламентам в границах данных зон» [Текст].– «Волгоградская правда», 2017.

75. Приказ комитета государственной охраны объектов культурного наследия Волгоградской области от 29.12. 17 № 212 «Об установлении границ и режима использования территории объекта культурного наследия регионального значения «Пожарная часть «Общество «Труд», кон. XIX в., расположенного по адресу: г. Волгоград, ул. Коммунистическая, 5» [Текст].– «Волгоградская правда», 2018.

76. Приказ Облкомкультуры Волгоградской области от 01.12.15 № 01-20/480 «Об утверждении границ зон охраны объекта культурного наследия регионального значения «Здание бывшего совнархоза», 60-е годы XX в., г. Волгоград,

Ворошиловский район, площадь Советская, а также требований к режимам использования земель и градостроительным регламентам в границах данных зон» [Текст].– «Волгоградская правда», 2015.– № 184.

77. Приказ Облкомкультуры Волгоградской области от 01.12.15 № 01-20/482 «Об утверждении границ зон охраны объекта культурного наследия регионального значения "Железнодорожная станция Ельшанка", нач. хх в., расположенного по адресу: г. Волгоград, Советский район, железнодорожная станция Ельшанка, а также требований к режимам использования земель и градостроительным регламентам в границах данных зон» [Текст].– «Волгоградская правда», 2015.– № 184.

78. Приказ Облкомкультуры Волгоградской области от 10.10.13 № 01-20/326 «Об утверждении границ зон охраны объекта культурного наследия регионального значения «Комплекс застройки пр. Ленина», 1950-е гг., расположенного по адресу: Волгоград, Центральный район, пр. Ленина, 4–59, режимов использования земель и градостроительных регламентов в границах указанных зон» [Текст].– «Волгоградская правда», 2013.– № 203.

79. Прогноз погоды [Электронный ресурс] // URL:<http://www.gismeteo.ru/> (дата обращения 15.01.2019).

80. Размер твердых частиц и аэрозолей в воздухе, воздействие на организм [Электронный ресурс] // URL: <https://tion.ru/blog/razmer-tverdyh-chastic/> (дата обращения 20.12.17).

81. Романиков, Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента [Текст] / Ю. И. Романиков, Л. С. Зажигаяев, А. А. Кишьян // Москва: Атомиздат, 1978.– 232 с.

82. Сидорова, Л. П. Метеорология и климатология. Часть 1. Метеорология [Электронный ресурс] / Л. П. Сидорова // Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015.– 198 с. URL: <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/13257/1/Sidorova.pdf> (дата обращения 20.12.17).

83. Сливина, Л. П. Формирование здоровья детей раннего возраста в условиях крупного промышленного города [Текст] / Л. П. Сливина, Л. К. Квартовкина // Поволжский экологический вестник.– Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2004.– С. 294–299.
84. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями N 1, 2) [Текст].– Москва: Минрегион России, 2012.
85. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [Текст].– Москва: Стандартинформ, 2017.
86. СП 72.13330.2016. Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 3.04.03-85 [Текст].– Москва: Стандарт, 2016.
87. Стеценко, С.Е. Исследование закономерностей процесса запыленности городской среды / С.Е. Стеценко, Г.А. Птичникова // Материалы XII Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», Хайфа, Израиль.– Волгоград: ВолгГАСУ, 2014 г.– С.108–112.
88. Стеценко, С.Е. Исследование механизма пылеотложения на поверхности наружных строительных материалов [Текст] / С.Е. Стеценко, В.Ф. Сидоренко, Г.А. Птичникова // Тезисы докладов научно–практической конференции молодых учёных.– Волгоград: ВолгГАСА, 2002.– С.57–59.
89. Стеценко, С.Е. механизм ветропереноса природно-техногенной пыли в условиях городской среды [Текст] / С.Е. Стеценко, Г.А. Птичникова, В.Ф. Сидоренко // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы экологического строительства», Тенерифе, Испания.– Волгоград: ВолгГАСА, 2001.– С.66-68.
90. Стеценко, С.Е. Учет фактора ветропылезащиты при реконструкции индустриальной жилой застройки городов Юга России [Текст] / С.Е. Стеценко, Г.А.

Птичникова, В.Ф. Сидоренко // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы международного сотрудничества в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды», Тунис.– Волгоград: ВолгГАСА, 2000.– С.30–33.

91. Стеценко С.Е. Определение пылеветровой нагрузки на территорию жилой застройки от природных и техногенных источников пылеобразования [Текст] / С.Е. Стеценко // Наука и образование как фактор оптимизации среды жизнедеятельности: Доклады международной научно-практической конференции-семинара, Хаммамет, Тунис.- Волгоград: ВолгГАСУ, 2004.- с. 139-140.

92. Стеценко, С.Е. Учет фактора запыленности в формировании городской застройки [Текст] // автореф. дис....канд. техн. наук / Стеценко Светлана Евгеньевна.– Москва,2006.– 19 с.

93. Строкинов, В.Н. Технология ремонта зданий и сооружений жилищного и культурно-бытового назначения [Текст] / под ред. В.Н. Строкинова, А.Н. Юзефовича // Москва: Изд–во Стройиздат, 1991.– 352 с.

94. Типовая технологическая карта № 7. Очистка от загрязнений фасадов зданий, окрашенных перхлорвиниловыми красками [Текст].– ЛНИИ АКХ № 1974.

95. Типовая технологическая карта № 8 Очистка от загрязнений облицованных фасадов зданий [Текст].– ЛНИИ АКХ № 1974.

96. Уиттекер Э.Т. Курс современного анализа. Часть 2 [Текст] / Э.Т. Уиттекер, Дж. Н. Ватсон // 2-е изд.– Пер. с англ.– Под ред. Ф. В. Широкова.– М.: Гос. изд–во физ.–мат. лит.– 1963.– 516 с.

97. Федеральный закон РФ от 04.05.1999 № 96-ФЗ (ред. от 27.12.2009) «Об охране атмосферного воздуха» (принят ГД ФС РФ 02.04.1999).

98. Федеральный закон РФ от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 18.10.2010) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».

99. Филин, В.А. Визуальная среда города [Текст] // Вестник Международной академии наук. Русская секция.– 2006.– №2.– С.43–50.
100. Черная, В.М. Факторы, влияющие на разрушение памятников архитектуры [Текст] / В.М. Черная // Сантехника, 2012.– №5.– С.20-23.– URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5384](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5384) (дата обращения 20.12.17).
101. Яковлев, А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов [Текст] / А.Д. Яковлев // Л.: Химия, 1989.– 384 с.: с ил.
102. Blades, N. Impact of aggregates extraction and transportation on the historic environment. Final project report [Text] / N. Blades, P. Greening, G. Marchant // University College London.– 2007.– 66p.
103. Dust 1: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014618468 / В. Н. Азаров [и др.]. № 2014616162; заявл. 26.06.2014; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 21.08.2014.
104. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution [Text] // Joint WHO Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution European Centre for Environment and Health Bonn Office.
105. Kontozova-Deutsch, V. Characterization of indoor and outdoor atmospheric pollutants impacting architectural monuments: the case of San Jerónimo Monastery (Granada, Spain) [Text] / V. Kontozova-Deutsch, C. Cardell, M. Urosevic, E. Ruiz-Agudo, F. Deutsch, R. Van Grieken // Environ Earth Sci.– 2011.– Vol. 63.– Pp. 1433–1445.
106. Kucera, V. Direct and indirect air pollution effects on materials including cultural monuments [Text] / V. Kucera, S. Fitz // Water, air and soil pollution, 1995, Vol.51.– №1.– P. 153–154.
107. Kuzmichev, A.A. Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning [Text] / A.A. Kuzmichev, V.F. Loboyko // Procedia Engineering.– Vol. 150.– 2016.– P. 2095–2101.– URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816315612#!>

108. Kuzmichev, A.A. The Impact of Dust Particles on Cultural Heritage Objects in the Field of Environmental Mechanics [Text] / A.A. Kuzmichev, V.N. Azarov, I.V. Stefanenko // Applied Mechanics and Materials.– 2018.– Vol. 878.– P. 259–262.

109. Kuzmichev, A.A. The research of contamination regularities of historical buildings and architectural monuments by methods of computer modeling [Text] / A.A. Kuzmichev, V.N. Azarov, A.V. Kuzmichev // MATEC Web of Conferences.– 2017.– Vol. 129.– 5 p.– URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/mateconf\\_icmtmte2017\\_05002/mateconf\\_icmtmte2017\\_05002.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/mateconf_icmtmte2017_05002/mateconf_icmtmte2017_05002.html).

110. Papazachou, N. Determination of organic and inorganic anions in atmospheric particulate matter and dust deposited on monuments [Text] / N. Papazachou, C. Samara // Proceedings of the 13th International Conference of Environmental Science and Technology.– Athens, Greece, 5–7 September 2013.

111. Zimon A.D. Adhesion of Dust and Powder [Text] / A.D. Zimon // Springer, 1969.–413 p.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А Сопроводительная документация



Общество с ограниченной ответственностью  
**УПРАВЛЕНИЕ ФАСАДРЕМОНТ**  
**ВОЛГОГРАДГОРГРАЖДАНСТРОЙ**

400005, г. Волгоград,  
 ул. Коммунистическая, 21  
 Тел.: 23-89-76, e-mail: ufrvgs@mail.ru

р/с 40702810511000001560 в  
 Волгоградское Отделение №8621 ПАО Сбербанк  
 г. Волгоград, БИК 041806647, к/с 30101810100000000647  
 ИНН 3444104085 КПП 344401001

*Исх. №126 от 29.05.2019г.*

### СПРАВКА

Дана Кузьмичеву Андрею Александровичу в том, что разработанная им методика оценки текущего и прогнозирования будущего загрязнения зданий и сооружений, а также периодичности очистки их вертикальных поверхностей использовалась в ООО «Управление Фасадремонт Волгоградгоргражданстрой» при выполнении работ по капитальному ремонту фасадов жилых домов г. Волгограда по заказу УНО «Регионального фонда капитального ремонта многоквартирных домов».

Директор ООО «УФР ВГТС»

Грушко В.А.





**Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно Проектная Организация Волгоградохра́нкульту́ра»**

**ООО «НПО Волгоградохра́нкульту́ра»**

Юридический адрес: 400074, г. Волгоград, ул. Социалистическая, 26  
Фактический адрес: 400074, г. Волгоград, ул. Социалистическая, 26  
ОГРН 1123460004106 ИНН/КПП 3445125994/346001001  
Телефон 8(8442) 98-17-18; E-mail: [npovolgcult@mail.ru](mailto:npovolgcult@mail.ru)

**СПРАВКА**

Дана Кузьмичеву Андрею Александровичу в том, что методика оценки, прогнозирования степени загрязнения, а также периодичности очистки вертикальных поверхностей зданий и сооружений, представленная в диссертационной работе Кузьмичева А.А. на соискание учёной степени кандидата технических наук, была использована ООО «НПО Волгоградохра́нкульту́ра» при разработке разделов научно-проектной документации на проведение работ по сохранению объекта культурного наследия регионального значения «Дом-музей А. С. Грина», конец XIX века. расположенного по адресу: РФ, Республика Крым, г. Феодосия, ул. Галерейная, 8-10, литеры «А», «А1», «Б» по заказу МКУ «Управление капитального строительства Администрации города Феодосии Республики Крым».

С уважением,

Директор

ООО "НПО Волгоградохра́нкульту́ра"



Подольский В.И.



**Клининговая компания**  
член МАКИЧ (Международная ассоциация  
компаний индустрии чистоты)

ООО «Чистый мир»  
ИНН/КПП 3444107872/344301001  
р/с 40702810900934208605  
в Волгоградский филиал АО «ЮниКредит Банк» г. Волгоград  
БИК 041806701  
Кор/сч 30101810800000000701

400002, г. Волгоград, проезд Тайшетский д. 8 тел. 26-99-48 E-mail: cleanworld2009@yandex.ru

Исх. № 73 от 14.05.2019 г.

### СПРАВКА

Дана Кузьмичеву Андрею Александровичу в том, что разработанная им методика оценки и прогнозирования степени загрязнения, а также периодичности очистки вертикальных поверхностей зданий и сооружений, представленная в диссертационной работе Кузьмичева А.А. на соискание учёной степени кандидата технических наук, была успешно апробирована в ООО «Чистый мир» при проведении работ по очистке фасадов зданий.

Директор ООО «Чистый Мир»

Кульмаметьев И.А.





ООО «Ассоциация Экотехмониторинг»  
ОГРН 1023403452731, ИНН 3444057420, КПП 344401001  
400087, г. Волгоград, улица Новороссийская, дом 10, офис 12  
р/с 40702810311280100177 Волгоградское ОСБ №8621 г. Волгоград  
БИК 041806647, к/с 30101810100000000647

телефон: (8442) 37-97-01, 37-12-76, e-mail: [ecomonitoring@list.ru](mailto:ecomonitoring@list.ru)

В диссертационный совет  
Д 212.028.09 при ФГБОУ ВО  
Волгоградский государственный  
технический университет

### АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы  
на соискание учёной степени кандидата технических наук**

**Кузьмичева Андрея Александровича**

Место внедрения: ООО «Ассоциация Экотехмониторинг», г. Волгоград.

Предмет внедрения: Способ обработки экспериментальных данных для прогнозирования запыления воздушной городской среды.

Результаты внедрения: Методика использована при разработке разделов проектов ОВОС и ПДВ.

Генеральный директор



С. А. Хабаров

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б Режим ветра в г. Волгограде за период 2015–2018 гг.

Таблица 1 – Среднегодовые и сезонные характеристики ветра в г. Волгограде за период 2015–2018 гг.

Год	Период	Характеристики	Направление ветра							
			с	с-в	в	ю-в	ю	ю-з	з	с-з
2015	Зима	Количество дней	7	5	15	8	9	7	29	10
		Средняя скорость ветра, м/с	4.4	3.6	3.5	6.2	7.5	7.4	7.1	6.1
	Весна	Количество дней	7	5	19	15	3	9	28	6
		Средняя скорость ветра, м/с	5.2	5.3	5.8	8.6	1.9	6.6	7.6	3
	Лето	Количество дней	12	10	7	10	5	7	22	19
		Средняя скорость ветра, м/с	4.7	4.6	4.2	3.8	5.4	5.1	6.1	4.6
	Осень	Количество дней	9	5	13	17	7	8	19	13
		Средняя скорость ветра, м/с	5.6	4.5	5.6	7.1	5	5.3	6.4	6.2
	Год	Количество дней	35	25	54	50	24	31	98	48
		Средняя скорость ветра, м/с	5	4.5	5.1	6.4	5	6.1	6.8	5
2016	Зима	Количество дней	13	5	10	13	7	11	24	8
		Средняя скорость ветра, м/с	4.6	5.7	6.2	6.8	3.2	6.1	7.1	6.6
	Весна	Количество дней	6	15	11	17	2	10	19	12
		Средняя скорость ветра, м/с	5.9	3.2	5.1	6.5	1.5	5.3	7.3	5
	Лето	Количество дней	10	9	23	17	9	6	9	9
		Средняя скорость ветра, м/с	4.1	4.2	4.3	4.3	3.2	3.1	5.5	4.2
	Осень	Количество дней	13	6	16	14	5	5	19	13
		Средняя скорость ветра, м/с	4.3	3.7	5.5	3.9	4.5	7.3	6	4.4

## Продолжение таблицы 1

2017	Зима	Количество дней	12	3	8	19	4	14	23	7
		Средняя скорость ветра, м/с	3.4	4.2	3.6	6.5	1.8	7	7	5.3
	Весна	Количество дней	6	4	7	26	9	9	19	12
		Средняя скорость ветра, м/с	4.3	4.8	8.4	6.9	6	4.3	8.1	6.9
	Лето	Количество дней	11	5	15	13	5	4	19	20
		Средняя скорость ветра, м/с	3.7	3.9	5.9	6.3	3.6	5.8	6.9	6.4
	Осень	Количество дней	7	8	16	16	11	12	15	6
		Средняя скорость ветра, м/с	4.2	4.6	7.4	5.2	6	4.2	7	4.3
	Год	Количество дней	36	20	46	74	29	39	76	45
		Средняя скорость ветра, м/с	3.9	4.4	6.3	6.2	4.3	5.3	7.2	5.8
2018	Зима	Количество дней	4	7	43	12	5	8	5	6
		Средняя скорость ветра, м/с	2	6.3	6.7	7.1	2.8	4	4.6	7.3
	Весна	Количество дней	5	6	25	15	5	8	16	12
		Средняя скорость ветра, м/с	4.8	7.1	5.3	8.2	6	6.1	7.2	4.9
	Лето	Количество дней	12	12	29	11	4	4	18	2
		Средняя скорость ветра, м/с	3.9	6.1	5.3	5.7	1.7	5	5.8	3
	Осень	Количество дней	9	3	24	18	5	7	20	5
		Средняя скорость ветра, м/с	5.8	3.7	7.5	5.3	3.5	5.4	6.1	4.1
	Год	Количество дней	30	28	121	56	19	27	59	25
		Средняя скорость ветра, м/с	4.1	5.8	6.2	6.6	3.5	5.1	6	4.8

**ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты натурных исследований загрязнения зданий в  
г. Волгограде за 2018 г.**

Таблица 2 – Значения толщины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup> (натурные и расчётные) за январь  
2018 г.

Дата	Направление ветра	V, м/с	$G_{\text{расч.}}, \text{мг/м}^2$		$G_{\text{натур.}}, \text{мг/м}^2$	
			фасад А	фасад Б	фасад А	фасад Б
1.01.18	В	4	284.66	-	260	-
2.01.18	СВ (отрыв)	4	21.31	-	18	-
3.01.18- 4.01.18	В	4.5	692.42	-	600	-
5.01.18	ЮВ	4	1162.49	-	1000	-
6.01.18- 7.01.18	ЮЗ (отрыв)	4	352.33	-	300	-
8.01.18- 10.01.18	СЗ	7	-	3074.21	-	2850
11.01.18- 12.01.18	СВ (отрыв)	6	32.57	2459.73	30	2300
13.01.18- 14.01.18	В	5	812.28	-	750	-
15.01.18	ЮВ	7	1837.02	-	1600	-
16.01.18- 18.01.18	В	8.7	4529.31	-	4200	-
19.01.18	ЮЗ (отрыв)	7	3721.11	1575.1	3500	1450
20.01.18- 21.01.18	ЮВ	7	4745.85	-	4400	-
22.01.18- 23.01.18	В	7	6028.01	-	5600	-
24.01.18	СВ (отрыв)	3	2603.35	646.36	2400	600
25.01.18- 28.01.18	В	6	4638.05	-	4300	-
29.01.18- 30.01.18	ЮВ	10	8143.32	-	7500	-
31.01.18	ЮЗ (отрыв)	10	0	109.14	0	100

Таблица 3 – Значения толщины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup> (натурные и расчётные) за июль 2018 г.

Дата	Направление ветра	V, м/с	$G_{\text{расч.}}$ , мг/м <sup>2</sup>		$G_{\text{натур.}}$ , мг/м <sup>2</sup>	
			фасад А	фасад Б	фасад А	фасад Б
1.07.18	В	3	9958.5	-	9200	-
2.07.18	З	7	-	5278.5	-	4800
3.07.18	СВ (отрыв)	4	0	3308.33	0	3100
4.07.18- 5.07.18	З	4.5	-	4725.87	-	4500
6.07.18	ЮВ	6	1712.2	-	1600	-
7.07.18	ЮЗ (отрыв)	4	763.65	3641	700	3400
8.07.18- 9.07.18	З	6	-	5776.05	-	5400
10.07.18	СЗ	3	-	6218.24	-	5800
11.07.18- 14.07.18	В	5	4049.85	-	3700	-
15.07.18	ЮВ	8	6640.77	-	6300	-
16.07.18	В	4	7243.56	-	6800	-
17.07.18	З	6	-	6843.58	-	6500
18.07.18	ЮЗ (отрыв)	10	839.34	1504.7	800	1400
19.07.18	С	5	-	2326.24	-	2200
20.07.18	В	4	1442.13	-	1350	-
21.07.18	З	6	-	3393.77	-	3200
22.07.18	С	1	-	3503.64	-	3300
23.07.18	Ю	2	1689.1	-	1600	-
24.07.18	В	1	1798.94	-	1700	-
25.07.18	ЮВ	9	4886.98	-	4500	-
26.07.18- 27.07.18	В	7	7568.45	-	7000	-
28.07.18- 29.07.18	Ю	3	7979.71	-	7500	-
30.07.18	В	7	9320.44	-	8800	-
31.07.18	СВ (отрыв)	9.5	0	3194.44	0	3000

Таблица 4 – Значения толщины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup> (натурные и расчётные) за 2018 г.

месяц	Фасад А		Фасад Б	
	начало	конец	начало	конец
январь	0	0	0	109.140216
февраль	0	1660.0396	109.1402	2973.17706
март	1660.04	2618.174	2973.177	776.084147
апрель	2618.17	1849.4311	776.0841	4080.44334
май	1849.43	1563.1411	4080.443	8651.33294
июнь	1563.14	9547.2359	8651.333	3937.75353
июль	9547.24	0	3937.754	3194.43765
август	0	12640.356	3194.438	739.572112
сентябрь	12640.4	0	739.5721	0
октябрь	0	5740.6912	0	827.586532
ноября	5740.69	1706.929	827.5865	4971.34665
декабрь	1706.93	4615.974	4971.347	1887.21669



**ПРИЛОЖЕНИЕ Г Данные теоретических расчётов налипания атмосферного  
аэрозоля городской среды (ААГС) на вертикальные поверхности зданий и  
сооружений за 2018 г.**

Таблица 5 – График зависимости величины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup>, налипшей на  
стеклянную вертикальную поверхность, от скорости ветра за год

$V$ , м/с	0÷3	4	5	6	7	8÷16
<b>Январь</b>	0	34.56	794.88	5529.6	20476.8	25315.2
<b>Февраль</b>	0	51.84	0	0	12441.6	66096
<b>Март</b>	0	0	1892.16	2764.8	8294.4	25228.8
<b>Апрель</b>	0	0	0	1296	0	10022.4
<b>Май</b>	0	17.28	397.44	5356.8	20390.4	25401.6
<b>Июнь</b>	0	17.28	587.52	5529.6	4060.8	0
<b>Июль</b>	0	34.56	794.88	1296	12441.6	10022.4
<b>Август</b>	0	17.28	993.6	0	8121.6	5097.6
<b>Сентябрь</b>	0	0	777.6	0	16416	45446.4
<b>Октябрь</b>	0	51.84	578.88	0	16588.8	15206.4
<b>Ноябрь</b>	0	17.28	570.24	0	0	45878.4
<b>Декабрь</b>	0	17.28	794.88	11059.2	4060.8	5097.6
<b>Год</b>	0	259.2	8182.08	32832	123292.8	278812.8
<b>Ср. знач.</b>	0	21.6	681.84	2736	10274.4	23234.4

Таблица 6 – График зависимости величины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup>, налипшей на оштукатуренную и окрашенную вертикальные поверхности, от скорости ветра за год

V, м/с	0÷3	4	5	6	7	8÷16
Январь	0	20.736	673.92	4492.8	16329.6	21081.6
Февраль	0	33.696	0	0	10886.4	57024
Март	0	0	628.128	2246.4	7257.6	20390.4
Апрель	0	0	0	950.4	0	7603.2
Май	0	12.96	336.96	4147.2	15724.8	21772.8
Июнь	0	7.776	459.648	4492.8	3024	0
Июль	0	25.92	673.92	950.4	10886.4	7603.2
Август	0	7.776	842.4	0	6048	4492.8
Сентябрь	0	0	582.336	0	13305.6	36979.2
Октябрь	0	28.512	413.856	0	14515.2	12787.2
Ноябрь	0	7.776	368.064	0	0	40435.2
Декабрь	0	12.96	673.92	8985.6	3024	4492.8
Год	0	158.112	5653.152	26265.6	101001.6	234662.4
Ср. знач.	0	13.176	471.096	2188.8	8416.8	19555.2

Таблица 7 – График зависимости величины слоя пыли  $G$ , мг/м<sup>2</sup>, налипшей на металлическую вертикальную поверхность, от скорости ветра за год

V, м/с	0÷3	4	5	6	7	8÷16
Январь	0	5.616	335.232	2419.2	5572.8	9054.72
Февраль	0	11.232	0	0	6220.8	29790.72
Март	0	0	259.2	1209.6	4147.2	7102.08
Апрель	0	0	0	112.32	0	1278.72
Май	0	5.616	167.616	1434.24	3974.4	11007.36
Июнь	0	0	175.392	2419.2	475.2	0
Июль	0	11.232	335.232	112.32	6220.8	1278.72
Август	0	0	419.04	0	950.4	2592
Сентябрь	0	0	183.168	0	5097.6	13564.8
Октябрь	0	5.616	99.36	0	8294.4	5823.36
Ноябрь	0	0	23.328	0	0	23328
Декабрь	0	5.616	335.232	4838.4	475.2	2592
Год	0	44.928	2332.8	12545.28	41428.8	107412.5
Ср. знач.	0	3.744	194.4	1045.44	3452.4	8951.04

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д Теоретический расчёт суммарного отрыва частиц городской пыли с различных вертикальных поверхностей зданий и сооружений

### 1 Теоретический расчёт суммарного отрыва частиц городской пыли с оштукатуренной и окрашенной поверхностей

Результаты экспериментальных исследований отрыва частиц пыли с вертикальных образцов – оштукатуренной и окрашенной поверхностей, показали, что регрессионная зависимость отрыва частиц пыли  $\gamma A_{отр.}$  от случайных факторов, таких как  $G$ , мг/м<sup>2</sup> – величина слоя пыли на вертикальной поверхности;  $V$ , м/с – скорости воздушного потока;  $\varphi$  – направление воздушного потока к вертикальной поверхности, представляет собой полином второй степени:

$$\gamma A_{отр.} = -0,993122 + 0,005084G + 0,000019V + 0,002330G \cdot \varphi - 0,000996V \cdot \varphi \quad (1)$$

Если, на основании [5,8,9,46], предположить, что распределение скоростей воздушного потока описывается законом распределения Вейбулла, то интегральная функция имеет вид:

$$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} \quad (2)$$

где  $k$  – параметр формы распределения;

$\beta$  – параметр масштаба распределения.

Плотность данного распределения задается формулой:

$$f(V, k, \beta) = \frac{k}{\beta} \left(\frac{V}{\beta}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} = \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} \quad (3)$$

Если угол воздушного потока к вертикальной поверхности имеет равномерный закон, то получим:

$$\gamma A_{отр.} = \frac{\alpha k}{\beta^k} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_0^{V_0} (a_1 + a_2 G + a_3 V + a_4 G \cdot \varphi - a_5 V \cdot \varphi - 1) \cdot V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \quad (4)$$

где  $\alpha = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1}$ ;  $a_1 = 0,006878$ ;  $a_2 = 0,005084$ ;  $a_3 = 0,000019$ ;  $a_4 = 0,002330$ ;  $a_5 = 0,000996$ .

$$\begin{aligned} \gamma A_{\text{сдвг.}} = & \frac{\alpha k}{\beta^k} \left( \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \left( \int_0^{V_0} (a_1 + a_2 G + a_4 G \cdot \varphi - 1) \cdot V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV + \right. \right. \\ & \left. \left. + \int_0^{V_0} (a_3 - a_5 \varphi) \cdot V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \right) d\varphi \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Вычислим интегралы:  $\int_0^{V_0} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV$  и  $\int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV$ , используя подстановку  $t = \frac{V^k}{\beta^k}$ .

Тогда  $V = \beta \cdot t^{\frac{1}{k}}$  и  $dt = \frac{kV^{k-1}}{\beta^k} dV$ .

$$1. \int_0^{V_0} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^k}{k} \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} e^{-t} dt = \frac{\beta^k}{k} \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \quad (6)$$

$$2. \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^{k+1}}{k} \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{1}{k}} e^{-t} dt. \quad (7)$$

Для вычисления интеграла в правой части (7) разложим подынтегральную функцию в степенной ряд:

$$e^{-t} = 1 - t + \frac{t^2}{2!} - \frac{t^3}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^n}{n!} + \dots$$

$$t^{\frac{1}{k}} e^{-t} = t^{\frac{1}{k}} - t^{\frac{1}{k}+1} + \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{2!} - \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n}}{n!} + \dots$$

Или

$$\int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} t^{\frac{1}{k}} e^{-t} dt = \int_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \left( t^{\frac{1}{k}} - t^{\frac{1}{k}+1} + \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{2!} - \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n}}{n!} + \dots \right) dt \quad (8)$$

Подставляя последнее выражение в (7) и интегрируя, получим значение интеграла:

$$\int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV = \frac{\beta^{k+1}}{k} \left( \frac{t^{\frac{1}{k}+1}}{\frac{1}{k}+1} - \frac{t^{\frac{1}{k}+2}}{\frac{1}{k}+2} + \frac{t^{\frac{1}{k}+3}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2!} + \dots + (-1)^n \frac{t^{\frac{1}{k}+n+1}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!} + \dots \right) \Bigg|_0^{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \quad (9)$$

В скобках знакочередующийся ряд, который сходится абсолютно, так как по признаку Даламбера сходится ряд, составленный из абсолютных величин членов исходного ряда. Для доказательства схождения ряда найдем предел отношения последующего члена ряда к предыдущему при стремлении  $n \rightarrow \infty$ . В нашем случае

$$u_n = \frac{t^{\frac{1}{k}+n+1}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!}; \quad u_{n+1} = \frac{t^{\frac{1}{k}+n+2}}{\left(\frac{1}{k}+n+2\right) \cdot (n+2)!}, \quad \text{тогда}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = |t| \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!}{\left(\frac{1}{k}+n+2\right) \cdot (n+2)!} = |t| \cdot 0 = 0 < 1 \quad (10)$$

Следовательно, при любом значении  $0 < t < \infty$  исходный ряд сходится абсолютно. Деля подстановку, получим окончательное значение второго интеграла:

$$\begin{aligned} \int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV &= \frac{\beta^{k+1}}{k} \left( \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+1\right)}}{\frac{1}{k}+1} - \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+2\right)}}{\frac{1}{k}+2} + \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+3\right)}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2!} + \dots + (-1)^n \frac{\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^{k \cdot \left(\frac{1}{k}+n+1\right)}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)!} + \dots \right) = \\ &= \frac{\beta^{k+1}}{k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k}+1\right) \beta^{1+k}} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right) \beta^{1+2k}} + \frac{V_0^{1+3k}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{1+3k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{1+(n+1)k}} + \dots \right) = \\ &= \frac{1}{k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k}+1\right)} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right) \beta^k} + \frac{V_0^{1+3k}}{\left(\frac{1}{k}+3\right) \cdot 2! \beta^{2k}} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая ранее полученные значения интегралов (6) и (11), имеем:

$$\begin{aligned} \gamma A_{omp.} = & \frac{\alpha k}{\beta^k} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (a_1 + a_2 G + a_4 G \cdot \varphi - 1) \cdot \frac{\beta^k}{k} \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) d\varphi + \\ & + \frac{\alpha k}{\beta^k} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (a_3 - a_5 \varphi) \cdot \frac{1}{k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k} + 1\right)} - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k} + 2\right) \beta^k} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k} + n + 1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right) d\varphi \end{aligned} \quad (12)$$

Или

$$\begin{aligned} \gamma A_{omp.} = & \alpha \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \cdot \left( (a_1 + a_2 G - 1) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{a_4 G (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)}{2} \right) + \frac{\alpha}{\beta^k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k} + 1\right)} - \right. \\ & \left. - \frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k} + 2\right) \beta^k} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k} + n + 1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right) \cdot \left( a_3 (\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{a_5 (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)}{2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

При  $V_0 \rightarrow \infty$  интеграл  $\int_0^{V_0} V^k e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} dV \approx \frac{\beta^{k+1}}{k} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)$ , тогда формула (13) примет

вид:

$$\begin{aligned} \gamma A_{omp.} = & \alpha \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \cdot \left( (a_1 + a_2 G - 1) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{a_4 G (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)}{2} \right) + \\ & + \alpha \beta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \cdot \left( a_3 (\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{a_5 (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)}{2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Вычислим суммарный отрыв частиц городской пыли с исследуемых поверхностей при исходных данных:  $a_1 = 0,006878$ ;  $a_2 = 0,005084$ ;  $a_3 = 0,000019$ ;  $a_4 = 0,002330$ ;  $a_5 = 0,000996$ ;  $\beta = 6,58$  [46];  $k = 10$  [46];  $G = 4$  мг/м<sup>2</sup> и значениях  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0,71$ . Учитывая, что  $V_0$  может изменяться от 1 до 16 с шагом 1, получим следующие результаты, отраженные на графике зависимости суммарного отрыва от

скорости воздушного потока для оштукатуренной и окрашенной поверхностей (рисунок 1).

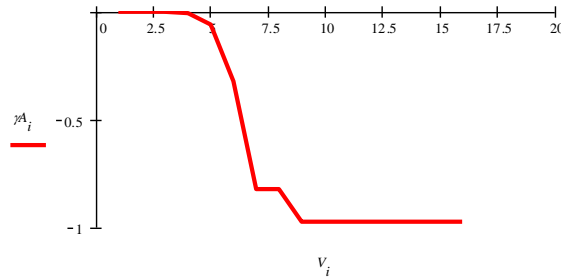


Рисунок 1 – Зависимость изменения величины слоя пыли от скорости воздушного потока на оштукатуренной и окрашенной поверхностях

## 2 Теоретический расчёт суммарного отрыва частиц городской пыли со стеклянной поверхности

Результаты экспериментальных исследований отрыва частиц пыли с вертикального образца – стеклянной поверхности, показали, что регрессионная зависимость отрыва частиц пыли  $\gamma A_{omp.}$  от случайных факторов, таких как  $G$  мг/м<sup>2</sup> – плотности налипания пыли на вертикальную поверхность;  $V$ , м/с – скорости воздушного потока;  $\varphi$  — косинуса угла воздушного потока к вертикальной поверхности, представляет собой полином второй степени:

$$\gamma A_{omp.} = -0,993219 + 0,007003G + 0,000012V + 0,002005G^2 + 0,000470\varphi^2 \quad (15)$$

Проводя аналогичные вычисления, получим формулу для определения доли пыли, которая отрывается с вертикальной поверхности под действием ветра:

$$\gamma A_{omp.} = \alpha \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \cdot \left( (a_1 + a_2G + a_4G^2 - 1) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{a_5(\varphi_2^3 - \varphi_1^3)}{2} \right) + \frac{\alpha}{\beta^k} \left( \frac{V_0^{1+k}}{\left(\frac{1}{k} + 1\right)} - \right.$$

$$\left. -\frac{V_0^{1+2k}}{\left(\frac{1}{k}+2\right)\beta^k} + \dots + (-1)^n \frac{V_0^{1+(n+1)k}}{\left(\frac{1}{k}+n+1\right) \cdot (n+1)! \beta^{nk}} + \dots \right) \cdot a_3 (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (16)$$

где  $a_1 = 0,006781$ ;  $a_2 = 0,007003$ ;  $a_3 = 0,000012$ ;  $a_4 = 0,002005$ ;  $a_5 = 0,000470$ ;

При  $V_0 \rightarrow \infty$  формула (13) принимает вид:

$$\gamma A_{\text{отр.}} = \alpha \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \cdot \left( (a_1 + a_2 G + a_4 G^2 - 1) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{a_5 (\varphi_2^3 - \varphi_1^3)}{3} \right) + \\ + \alpha \beta \cdot a_3 \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right). \quad (17)$$

Вычислим суммарный отрыв частиц городской пыли с исследуемой вертикальной поверхности при исходных данных:  $a_1 = 0,006781$ ;  $a_2 = 0,007003$ ;  $a_3 = 0,000012$ ;  $a_4 = 0,002005$ ;  $a_5 = 0,000470$ ;  $\beta = 6,58$  [46];  $k = 10$  [46];  $G = 4$  мг/м<sup>2</sup> и значениях  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0,71$ . Результаты отражены на графике зависимости суммарного отрыва частиц от скорости воздушного потока для стеклянной поверхности (рисунок 2).

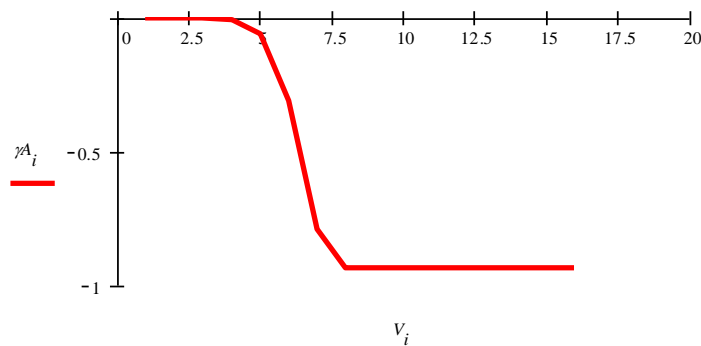


Рисунок 2 – Зависимость изменения величины слоя пыли от скорости воздушного потока на стеклянной поверхности



### 3 Теоретический расчёт изменения величины слоя пыли на металлической поверхности

Результаты экспериментальных исследований отрыва частиц с вертикального образца – металлической (стальной) поверхности, показали, что регрессионная зависимость отрыва частиц  $\gamma A_{\text{отр.}}$  от случайных факторов, таких как  $G$ ,  $\text{мг/м}^2$  – плотности налипания пыли на вертикальную поверхность;  $V$ ,  $\text{м/с}$  – скорости воздушного потока;  $\varphi$  – косинуса угла воздушного потока к вертикальной поверхности, представляет собой полином второй степени:

$$\gamma A_{\text{отр.}} = -0,992702 + 0,007202G + 0,001975G^2 \quad (18)$$

В данном случае

$$\gamma A_{\text{отр.}} = \alpha \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_0}{\beta}\right)^k} \right) \cdot (a_1 + a_2G + a_3G^2 - 1) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) , \quad (19)$$

Вычислим суммарный отрыв частиц городской пыли с исследуемой вертикальной поверхности при исходных данных:  $a_1 = 0,007298$  ;  $a_2 = 0,007202$  ;  $a_3 = 0,001975$  ;  $\beta = 6,58$  [46];  $k = 10$  [46];  $G = 4 \text{ мг/м}^2$  и значениях  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0,71$ . Результаты отражены на графике зависимости суммарного отрыва частиц пыли от скорости воздушного потока для металлической (стальной) поверхности (рисунок 3).

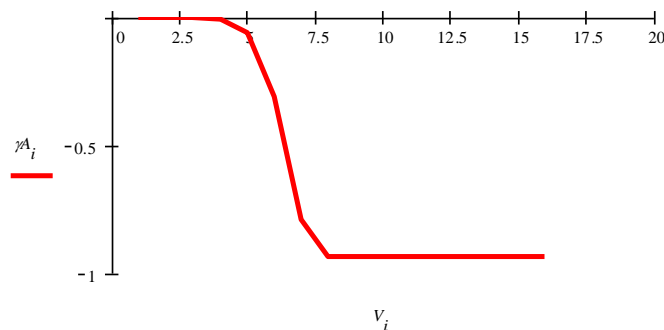


Рисунок 3 – Зависимость изменения величины слоя пыли от скорости воздушного потока на металлической (стальной) поверхности