

На правах рукописи



МАНЖИЛЕВСКАЯ СВЕТЛАНА ЕВГЕНЬЕВНА

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
ТОЧЕЧНОЙ ЗАСТРОЙКЕ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ
МИНИМИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПЫЛЬЮ**

2.10.2 Экологическая безопасность
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный консультант **Маилян Дмитрий Рафаэлович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии строительных наук России, Почетный строитель РФ» и «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Официальные оппоненты **Мензелинцева Надежда Васильевна**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Экология и природопользование» ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», профессор.

Батаев Дена Карим-Султанович, доктор технических наук, профессор, академик АН ЧР, Комплексного научно-исследовательского института имени Х. И. Ибрагимова Российской академии наук, директор.

Литвинова Наталья Анатольевна, доктор технических наук, доцент, член Российской академии естествознания (РАЕ), кафедра «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Защита диссертации состоится «14» апреля 2026 г. в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.282.11 созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, г. Волгоград, Волгоградская область, ул. Академическая, 1, ауд. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на официальном сайте <http://www.vstu.ru/upload/iblock/13d/13d222ae6ba750c2d6237ec43ce44a8b.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Околелова Алла Ароновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. В большинстве стран мира строительная отрасль является одним из основных источников загрязнения воздуха городских территорий. Одним из наиболее опасных загрязняющих веществ являются частицы мелкодисперсной пыли PM_{2,5} и PM₁₀, образующиеся при строительных процессах. Экологическая безопасность строительства – это комплекс мероприятий, методов, нормативных документов, проектных решений управленческого, организационного, технологического и экономического характера, опирающийся на законодательные акты в области охраны окружающей среды, принципы ресурсо- и энергосбережения, природосбережения, позитивный человеческий опыт реальной строительной деятельности. Решение такой сложной, многокритериальной задачи в современных исследованиях базируется на системном подходе, который уже показал свои преимущества при решении различных задач, связанных с экологической безопасностью городских территорий. В настоящее время одним из наиболее распространённых видов застройки является точечная застройка. По пути точечной застройки идут крупнейшие города мира, выбирая ее в качестве приоритета пространственного развития. Аналитики отмечают отрицательное влияние точечной застройки на окружающую среду, в частности на атмосферу, но фундаментальных исследований в этом направлении не проводится.

В условиях роста объемов локального строительства и точечной застройки в стесненных городских условиях остро стоит вопрос создания и сохранения благоприятной экологической обстановки. Это требует исследований, проведения мониторинга выбросов пыли не только на период строительства, но и на различных этапах жизненного цикла объекта, в частности, на этапе проработки проектных решений по возведению объектов с учетом полученных ранее результатов.

Важность проведения подобных исследований подчеркивается реализацией федерального проекта «Чистый воздух» в России. Согласно утвержденному президиумом Совета при Президенте РФ паспорту национального проекта «Экология» от 24.12.2018 года № 16, одним из ключевых показателей этого проекта является уменьшение объема выбросов вредных веществ в атмосферу на 22 % в наиболее загрязненных городах к 2025 году. В Российской Федерации осуществляется переход на применение отечественного оборудования за счет сокращения импорта согласно Постановлению Правительства РФ от 16 сентября 2016 г. N 925 «О приоритете товаров российского происхождения, работ, услуг, выполняемых, оказываемых российскими лицами, по отношению к товарам, происходящим из иностранного государства, работам, услугам, выполняемым, оказываемым иностранными лицами». Актуальны задачи создания современных, практичных, экономически, отечественных эффективных систем и технологий по борьбе с распространением пыли на территориях городов для включения их в перечень закупок в инвестиционно-строительных проектах.

В рамках национального проекта «Экологическое благополучие», утвержденного указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 на 2025 год, ставится задача сохранения и восстановления благополучия

окружающей среды. Одним из ключевых направлений проекта является снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Этот факт определяет научную проблему исследования, которая заключается в несоответствии состояния экологической безопасности и уровня загрязнения атмосферного воздуха городских территорий при точечной застройке и нормативной моделью расчёта, принятой в научной и проектной практике, не отражающей комплексного характера обеспечения экологического благополучия. В этом контексте данная работа является особенно актуальной.

Степень разработанности темы. При подготовке к строительству, в процессе строительного производства, эксплуатации и ликвидации объектов застройки необходимо соблюдать требования экологической безопасности, охраны труда и рационального использования ресурсов. Важно контролировать выбросы пыли, чтобы минимизировать ее концентрацию и ее воздействие на здоровье человека.

При оценке качества атмосферного воздуха необходимо учитывать физико-химические и морфологические свойства пыли, ее токсичность и способность к адсорбции примесей. Для этого надо выявить и оценить общее содержание взвешенных веществ на строительной площадке для принятия мер по повышению экологической безопасности. Также следует разработать меры по регулированию выбросов пыли при строительстве с целью повышения безопасности.

Проблема сохранения окружающей среды и защиты человека от вредного воздействия строительства становится все более актуальной в связи с увеличивающимися масштабами точечного строительства и возрастающей оснащенностью строительства техническими средствами. Работы отечественных и зарубежных ученых Азарова В.Н., Бакаевой Н.В., Батаева Д.К.-С., Беспалова В.И., Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Ветровой Н.М., Гаспарьян Н.А., Головиной Е.И., Гуровой О.С., Данелянц Д.С., Желтобрюхова В.Ф., Калюжиной Е.А., Ковшова С.В., Кузьмичева А.А., Литвиновой Н.А., Ложкиной О.В., Лупиногина В.В., Магомадова И.З., Май И.В., Мензелинцевой Н.В., Новиковой В.С., Оводкова М.В., Панкова А.А., Савиновой А.М., Сергиной Н.М., Сысоевой Е.В., Тertiшниковой И.В., Трохимчук К.А., Тунаковой Ю.А., Уляшевой Е.Т., Фукса Н.А., Шагидуллина А.Р, M. Ishizuka, M. Mikami, J. Leys, Huan Jing Ke Xue, Weinan Chen, L.I. Xiaolan, Hyun-jun Noh, Nitzan Swet, Tov Elperin, Jasper F. Kok, Raleigh L. Martin, Sarkar A., Sun W.-Y., Sisara Samaradiwakara, Erich M. Courtright, Brandon L. Edwards, Rende Wang, Qing Li, Na Zhou, Chunping Chang, Yaping Shao, Saeed Abolhasani, H. Christopher Frey, Kangwook Kim, Zachary M. Klaver, Shih-Hao Pang и многих других посвящены исследованию запыленности воздуха и оценки ее влияния на экологическую безопасность. Комплексная экологическая оценка воздействия точечной застройки на состояние атмосферного воздуха с проведением долгосрочного экологического мониторинга, определение объемов выделяемых загрязняющих веществ, работ по рациональной организации и управлению строительными процессами на площадке и внедрению организационно-технологических мероприятий в строительный процесс с целью снижения уровня выбросов ранее не выполняли. Это требует систематизации полученных данных, долгосрочного анализа, оценки и контроля содержащихся в атмосфере взвешенных веществ при точечном, локальном строительстве.

В настоящей работе теоретически и экспериментально обоснованы основные принципы и технические, социальные, эколого-экономические, управленческие методы экологической защиты городской территории от вредного воздействия мелкодисперсной пыли в процессе реализации точечной застройки, работ по реконструкции зданий и сооружений, проведены расчетная и экспериментальная оценки их воздействия на окружающую среду.

Цель работы – разработка научных основ и методологии формирования системы экологической безопасности при точечной застройке с учетом особенностей строительства на различных этапах строительных и ремонтных работ для минимизации загрязнения атмосферного воздуха, в том числе мелкодисперсной пылью.

Объект исследования – строительные площадки, как источник загрязнения пылью воздушной среды прилегающих территорий при точечной застройке.

Предмет исследования – показатели качества воздушной среды на строительной площадке точечной застройки и прилегающей к ней территории.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ предыдущих исследований отечественных и зарубежных ученых, проводимых с целью изучения выбросов пыли при строительстве, в том числе выбросов частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$.

2. Провести анализ строительных работ как источников пылевыведения при точечной застройке, их классификацию. Провести экспериментальные и натурные исследования валовых и максимально разовых выбросов пыли от строительных процессов при точечной застройке. Провести натурные исследования на реальных объектах точечной застройки с целью оценки запыленности воздушной среды на строительной площадке в зоне влияния источников пыления.

3. Исследовать дисперсный анализ пыли в рабочих зонах на стройплощадке, в том числе на различных высотах. На основании исследования дисперсного состава микроскопическим методом и прямых измерений получить функции прохода в диапазоне частиц $PM_{0,5}$ - PM_{10} .

4. Провести теоретическое и экспериментальное исследования параметров пыли в выбросах в атмосферу при точечном строительстве. Исследовать эффективность различных теоретических моделей для построения интегральных функций распределения по эквивалентным диаметрам частиц на базе интегральной функции прохода для оценки зависимости пылевого загрязнения в воздухе строительной площадки и близлежащей территории. Выполнить статистическую обработку данных с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова.

5. Провести экспериментальные и натурные исследования для каждого технологического строительного процесса с целью построения дифференциальных функций распределения значений прохода при фиксированных диаметрах частиц d_{ϕ} . Доказать, что интегральные функции распределения частиц по эквивалентному диаметру пыли в воздухе строительной площадки и близлежащих территорий характеризуются как два зависимых друг от друга случайных процесса.

6. Разработать технические решения по защите воздушной среды близлежащих территорий от пылевого загрязнения строительной площадки.

Определить взаимосвязь концентраций частиц PM10 и PM2,5 на стройплощадке и на близлежащей территории как случайных величин.

7. Разработать принципы мониторинга концентрации пыли, в том числе частиц PM2,5 и PM10 воздушной среды в жилой зоне вблизи точечной застройки с учетом параметров пылевыведения каждого строительного процесса в зависимости от параметров воздушной среды на строительной площадке. Исследовать возможность внедрения в систему прогнозирования алгоритмов и моделей машинного обучения для повышения эффективности прогнозируемых данных о запыленности воздушной среды.

8. Разработать метод организационно-технологического проектирования для проектной документации с целью строительства или реконструкции объектов точечной застройки, включающий экологический критерий, в результате которого появиться возможность уже на стадии проектировать рассчитывать максимально разовый и валовый пылевые выбросы в воздушную среду на строительной площадке. Усовершенствовать метод контроля, прогнозирования и мониторинга запыленности воздушной среды на стройплощадке и близлежащей территории.

9. Разработать систему индикаторов для экологического риск-анализа влияния частиц PM2,5 и PM10 на городскую территорию от точечной застройки.

10. Исследовать возможность использования полученных результатов в сводных расчетах загрязнения атмосферного воздуха с учетом выбросов пыли от источников строительного производства – объекта точечной застройки.

11. Апробировать полученные результаты в производственных условиях и оценить соответствие предложенных решений критериям отнесения к наилучшим доступным технологиям в сфере защиты атмосферного воздуха от загрязнения.

12. Выполнить расчет социально-экономического предотвращенного экологического вреда благодаря внедрению разработанных технических решений по защите близлежащие территории за счет сокращения выбросов пыли от строительства.

Научная новизна состоит в том, что:

- разработаны основополагающие принципы формирования системы экологической безопасности воздушной среды вблизи точечной застройки с учетом особенностей жизненного цикла и критерия минимизации загрязнения атмосферного воздуха;

- определена интенсивность пылевыведения от технологических процессов точечной застройки и предложена классификация этих источников, что позволяет теоретически рассчитать выбросы от различных строительных процессов;

- получены интегральные функции распределения частиц мелкодисперсной пыли с размерами от PM2,5 до PM10, поступающим в атмосферу при ведении отдельных видов строительных и ремонтно-строительных работ, проведена аппроксимация данных функций;

- усовершенствована динамическая сетевая модель производства строительных работ при точечной застройке за счет учета в сетевом графике пылевыведений технологических строительных процессов и учета прогнозирования концентраций пыли в воздухе близлежащей жилой зоны и использования технических средств по ее снижению;

- экспериментальным путем получены дифференциальные функции распределения значений прохода при фиксированных диаметрах частиц d_q , что позволило рассматривать интегральные функции распределения массы частиц по диаметрам и интегральную концентрацию, характеризующую массовую долю частиц с меньшим диаметром, как случайные процессы;

- усовершенствована система организации мониторинга качества воздушной среды в жилой зоне при точечной застройке в зависимости от параметров воздушной среды на строительной площадке с использованием алгоритмов машинного обучения XGBoost, Random Forest (RF) и ARIMA.

Научная гипотеза заключается в том, что предложенный научный подход к снижению выбросов пыли при строительстве жилой точечной застройки за счет создания комплексной системы с внедрением защитных организационно-технологических решений, управленческих методов по определению эколого-экономических рисков и программ мониторинга с авторскими новыми технологиями прогнозирования выбросов пыли на строительной площадке точечной жилой застройки с помощью математических моделей машинного обучения позволит достичь реализации проектов точечной застройки на территории агломераций, не нанося экологический вред территории и населению, проживающему вблизи территорий строительства.

Личный вклад автора состоит в: формулировании темы, цели и задач диссертационного исследования; отборе и анализе материалов, изложенных в научно-технических источниках; выполнении теоретических исследований; планировании, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе их результатов; апробации предлагаемых решений. Диссертация базируется на результатах исследований, выполненных в течение 2013 – 2025 гг. лично автором.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- проведен анализ технологических процессов при строительстве как источников пылевыведения, который позволяет провести их квалификацию;

- проведены экспериментальные исследования валовых и максимальных разовых выбросов от технологических строительных процессов как источников пылевыведения;

- проведены натурные исследования запыленности воздушной среды на строительной площадке в зоне влияния источников пыления (технологические строительные процессы);

- проведены натурные исследования запыленности воздушной среды близлежащих территорий при точечной застройке. Для технологических процессов строительства был определен дисперсный состав пыли в рабочих зонах на стройплощадке в том числе на различной высоте. На основании исследования дисперсного состава микроскопическим методом и прямых измерений получены функции прохода в диапазоне частиц PM_{0,5}-PM₁₀;

- проведен анализ существующих моделей построения интегральных функций распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам для оценки частиц PM_{2,5}-PM₁₀ в воздухе на строительной площадке и в воздухе близлежащей территории, лучше всего подходят трехзвенные модели

(прямая+парабола+гипербола). Проверка проводилась на основании критерий согласия Пирсона и Колмогорова;

- проведены экспериментальные и натурные исследования для каждого технологического строительного процесса с целью построения дифференциальных функций распределения значений функций прохода при фиксированных диаметрах частиц d_v и рассмотрены интегральные функции распределения как случайный процесс. Аналогично, как случайный процесс, можно рассматривать интегральную концентрацию пыли;

- исследованы концентрации общая, частиц PM10, частиц PM2,5 при применении разработанных автором технических решений: пылезащитный экран, пушка пылеулавливания, конструкций зеленых крыш, которые показали их достаточно высокую эффективность. Для оценки мероприятий по защите воздушной среды близлежащих территорий следует учитывать взаимосвязь концентраций частиц PM10 и PM2,5 на стройплощадке и на близлежащей территории;

- разработана ансамблевая модель с использованием алгоритмов машинного обучения XGBoost, Random Forest (RF) и ARIMA для прогнозирования запыленности атмосферного воздуха жилой зоны в зависимости от климатических факторов и технологических строительных процессов;

- усовершенствован сетевой график производства работ с учетом дополнительной информации о прогнозировании запыленности в зоне производства технологических строительных операций при точечной застройке, на основании которого сформирован ГИС слой в программе ArcGIS Online для прогнозирования запыленности на стройплощадке;

- предложена система индикаторов для экологического риск-анализа влияния частиц PM2,5 и PM10 на городскую территорию от точечной застройки;

- выполнен расчет социально-экономического предотвращенного экологического вреда благодаря внедрению разработанных технических решений по защите близлежащие территории за счет сокращения выбросов пыли от строительства;

- усовершенствованы программы мониторинга качества воздушной среды в жилой зоне при точечной застройке за счет учета климатических условий и выбора контрольных точек проведения замеров;

- полученные автором результаты апробированы в производственных условиях. Результаты диссертационного исследования внедрены в АО «РЖДстрой» г. Москва, АО институт «Ростовский Промстройинипроект» г. Ростов-на-Дону, ООО «ИБТ» г. Москва, ООО «Альфа Инжиниринг», г. Ростов-на-Дону, ООО «Р-Строй» г. Ростов-на-Дону, ИП Акопян В.Ф. г. Ростов-на-Дону. Разработанные новые научно-обоснованные технические решения по сокращению выбросов пыли на строительной площадке относятся к современным отечественным разработкам по защите атмосферного воздуха от загрязнения пылью, что дает возможность беспрепятственного процесса их внедрения в практическую деятельность предприятий и организаций;

- предложены методы учета выбросов пыли от источников строительного производства при проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного

воздуха ФГБУ «ВНИИ Экология» в городах в рамках федерального проекта «Чистый воздух» нацпроекта «Экология».

Методология и методы диссертационного исследования: проведение экспериментальных исследований в лабораторных и опытно-промышленных условиях с использованием современного поверенного оборудования; математическое и физическое моделирование; обобщение известных научно-технических результатов; сопоставление данных других авторов с результатами проведенных экспериментов; использование методик и планирования экспериментов, утвержденных межгосударственными и национальными стандартами РФ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Положение о проведении анализа технологических строительных процессов как источников пылевыведения. Проведены экспериментальные и натурные исследования валовых и максимально разовых выбросов пыли от технологических строительных процессов как источников пылевыведения. Проведены натурные исследования на реальных объектах точечной застройки с целью оценки запыленности воздушной среды на строительной площадке в зоне влияния источников пыления (технологических строительных процессов).

2. Положение о проведенном исследовании анализа дисперсного состава пыли в рабочих зонах на стройплощадке, в том числе на различных высотах. Исследован дисперсный состав пыли и получены функции прохода в диапазоне частиц $PM_{0,5}$ - PM_{10} .

3. Положение о проведенных теоретическом и экспериментальном исследованиях параметров пыли в выбросах в атмосферу при точечном строительстве. Исследована эффективность различных теоретических моделей для построения интегральных функций распределения по эквивалентным диаметрам частиц на базе интегральной функции прохода для оценки зависимости пылевого загрязнения в воздухе строительной площадки и в воздухе близлежащей территории. Проведена статистическая обработка данных с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова.

4. Положение о проведенных экспериментальных и натурных исследований для каждого технологического строительного процесса с целью построения дифференциальных функций распределения значений функций прохода при фиксированных диаметрах частиц $d_{\text{ч}}$. Доказано, что интегральные функции распределения частиц по эквивалентному диаметру пыли в воздухе строительной площадки и близлежащих территорий характеризуются как два случайных зависимых друг от друга процесса.

5. Положение о разработке новых технических решений по защите воздушной среды близлежащих территорий от пылевого загрязнения строительной площадки: пылезащитный экран (патент №192629) пушка пылеподавления (патент №197551), две конструкции зеленых крыш для общественных зданий (патент №163334) и жилых домов (патент № 191863). Доказана эффективность разработанных решений.

6. Положение о разработке принципов мониторинга качества атмосферного воздуха в жилых зонах вблизи точечной застройки в зависимости от параметров воздушной среды на строительной площадке. Исследована

возможность внедрения в систему прогнозирования алгоритмов и моделей машинного обучения для повышения эффективности прогнозируемых данных о запыленности воздушной среды.

7. Положение о разработке метода организационно-технологического проектирования для проектной документации с целью строительства или реконструкции объектов точечной застройки, включающий экологический критерий – сетевой график производства работ с учетом дополнительной информации о прогнозировании запыленности в зоне производства технологических строительных операций при точечной застройке. Усовершенствован метод контроля, прогнозирования и мониторинга запыленности воздушной среды на стройплощадке и близлежащей территории.

8. Положение о разработке системы индикаторов для экологического риск-анализа влияния частиц PM_{2,5} и PM₁₀ от точечной застройки на воздушную среду городской территории от точечной застройки.

9. Положение об апробации полученных результатов в производственных условиях и оценке соответствия предложенных решений критериям отнесения к наилучшим доступным технологиям в сфере защиты атмосферного воздуха от загрязнения.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована применением классических положений теории распределения массы частиц, использованием современных методик исследования, сходимостью аналитических и экспериментальных результатов (относительная погрешность не более $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 0,95 и получением прогнозируемого эффекта в практическом использовании.

Апробация результатов. Результаты диссертационных исследований докладывались и получили одобрение на: Актуальные проблемы науки и техники ДГТУ (г. Ростов-на-Дону, 19-21 марта 2024 г.; г. Ростов-на-Дону, 19-21 марта 2024 г.); Международная научно-практическая конференция факультета промышленного и гражданского строительства ДГТУ «Строительство и архитектура» (г. Ростов-на-Дону, 19-23 апреля 2021 г.; г. Ростов-на-Дону, 19-21 апреля 2022 г.; г. Ростов-на-Дону, 19-21 апреля 2023 г.; г. Ростов-на-Дону, 17-19 апреля 2024 г.); «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности» (г. Волгоград, 24-29 апреля 2023 г.); «Актуальные проблемы моделирования, проектирования и прогнозирования социальных и политических процессов в мультикультуральном пространстве современного общества» (г. Ростов-на-Дону, 06-07 апреля 2023 г.); «Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической» (г. Ростов-на-Дону, 12-13 декабря 2023 г.); 7-й Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России». Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды (г. Курск, 12 декабря 2022 г.); XIV Международная научно-практической конференция «Экспертиза и управление недвижимостью: информационное моделирование, энергосбережение, зеленые технологии» (г. Ростов-на-Дону, 14 октября 2022 г.); CATPID-2020, г. Казань, 26-30 сентября 2020 г.); XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021», г. Ростов-на-Дону, 24-26 февраля 2021 г.; Инновационные технологии в науке и образовании («ИТНО 2020», г. Ростов-на-

Дону, 19-30 августа 2020 г.); Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019, с. Дивноморское, Краснодарский край, 9-14 сентября 2019 г.); International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development» (CATPID-2019, г. Кисловодск, 1-5 октября 2019 г.); EMMFT 2019, г. Воронеж, 28-30 ноября 2019 г.); International Scientific-Practical Conference on Business Cooperation (ISPCBS, г. Псков, 21-23 мая 2019 г.); XXVIII-S-P Seminar «Theoretical Foundation of Civil Engineering» (TFoCE, г. Ростов-на-Дону, 17-21 сентября 2018 г.); International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2018, г. Воронеж, 10-13 декабря 2018 г.

Публикации. Основные результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертационной работы, изложены в 85 печатных работах, в том числе: 14 статей, индексируемых в Международных базах данных Scopus и Web of Science, 18 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 4 патента РФ, 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 196 наименований, 3 приложения, содержит 227 страниц текста, в том числе 82 рисунка, 27 таблиц и 31 формулу, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность избранной темы и степень ее разработанности, представлена научная новизна и вклад автора, оценена теоретическая и практическая значимость работы, показана апробация диссертации, обоснована степень достоверности, сформулирована цель, определены задачи и описаны методология и методы диссертационного исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу исследований отечественных и мировых достижений, направленных на обоснование разнообразных методов и средств для снижения выбросов пыли, поступающей в городскую окружающую среду при строительстве объектов точечной застройки.

Взвешенные частицы — это твёрдые и жидкие вещества малого размера, которые содержатся в воздухе в виде аэрозоля. Их токсичность определяется не только химическим составом, но и размерами. Установлено, что в районах с высокой концентрацией взвешенных частиц растёт распространённость бронхолёгочных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Некоторые виды взвешенных частиц и их влияние на организм человека: частицы диаметром менее 10 мкм (PM₁₀) способны проникать по бронхиальному дереву и накапливаться в тканях лёгких; частицы диаметром менее 2,5 мкм (PM_{2,5}) достигают бронхиол и альвеол; наночастицы диаметром менее 0,1 мкм (PM_{0,1}) проникают в кровоток. По данным ВОЗ, нет порогового уровня, за которым взвешенные частицы больше не представляют опасности для здоровья.

Правительство разных стран по-разному относятся к выбору политики по снижению выбросов пыли, в том числе от строительного производства.

Внедрение мер поддержки и ограничений зависит от социально-экономической и политической ситуации.

При точечной застройке здоровье рабочих и населения подвергается опасности из-за трех ключевых источников загрязнения воздуха пылью: деятельность, связанная с эксплуатацией строительных машин и оборудования, фоновая концентрация пыли, которая изначально присутствует в воздухе на данной территории, строительные процессы. В городах с плотной застройкой поддержание экологических условий и снижение загрязнения воздуха частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} требует разработки проектных технических решений на строительных площадках. Для выбора и обоснования решений используются современные технологии и искусственный интеллект, такие как метод роя частиц, машинное обучение, нейронные сети и авторегрессия. Важным инструментом выбора решений является экологический мониторинг территории и моделирование рисков для защиты воздуха.

Обзор литературы показал, что большинство исследований направлено на разработку технологических мер для борьбы со строительной пылью. При этом, мало внимания уделяется снижению уровня концентрации пыли с помощью управленческих инструментов. Необходима разработка компактных и доступных устройств защиты от выбросов пыли и системы расчета распределения мелкодисперсной пыли на региональном уровне. Анализ показал ограниченность систематических исследований по этой теме.

Во **второй главе** проведен анализ строительного производства как источника выделения пыли при точечном строительстве, представлены результаты натурных исследований общей концентрации взвешенных веществ в зоне влияния точечной застройки на строительной площадке 20-этажного жилого дома в г. Ростове-на-Дону по ул. Магнитогорская, д. 2Б, рисунок 1. Обобщенные результаты по исследованным объектам (таблица 1) позволяют оценить среднюю концентрацию взвешенных веществ в зоне точечной застройки.

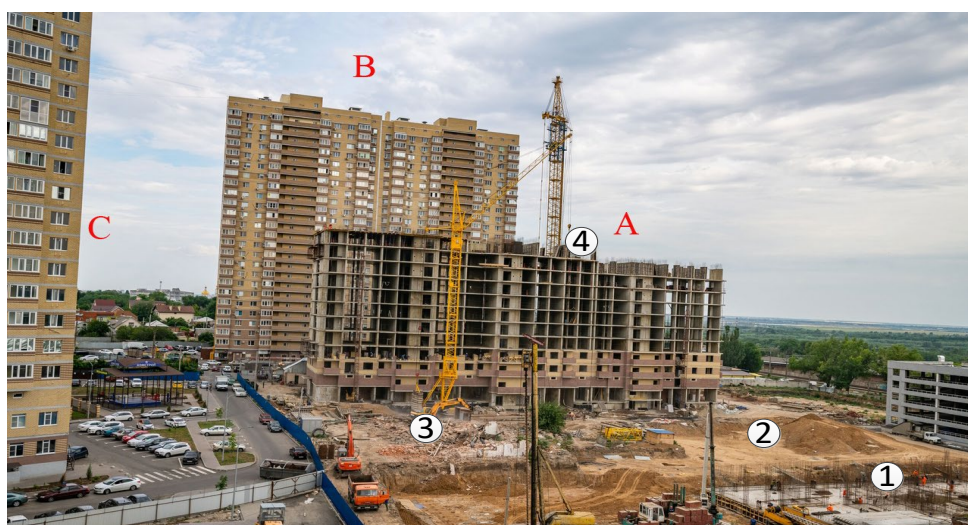


Рисунок 1 – Объект исследования общей концентрации взвешенных веществ в зоне влияния точечной застройки: 1-4 – точки забора проб;

А – строительная площадка; В – жилой заселённый дом; С – жилой дом, недавно введённый в эксплуатацию.

Анализ качественного состава пыли, отобранной в ходе исследования, показал, что основными компонентами проб были элементы: С, О, Si и Са. При этом следует отметить, что состав для крупных частиц в воздухе строительной площадки и элементный состав мелкодисперсной пыли в жилой зоне существенно отличается.

Таблица 1 – Средняя концентрация взвешенных веществ в зоне точечной застройки

Наименование объекта исследования	Место отбора проб		Показатель концентрации, мг/м ³
	Этаж	Контрольная точка отбора	
25-этажный жилой дом рядом со строительной площадкой	2	внутри	1,83
	6	внутри	4,84
	11	внутри	1,00
	16	внутри	0,68
	21	внутри	1,20
	25	внутри	0,70
Строительная площадка с объектом строительства	1	снаружи	0,30
	1	снаружи	0,80
	1	снаружи	0,80
	1	снаружи	0,65
20-этажный дом с ремонтно-строительными работами	2	внутри	1,70
	6	внутри	0,95
	11	внутри	0,36
	16	внутри	4,01
	20	внутри	1,07

Для анализа уровня пылевыведения источников во время строительных работ была разработана система оценок. Отнесение того или иного технологического процесса к определенному уровню пылевыведения I_{Π} определяли на основании 3 параметров: длительность процесса пыления K_1 ; концентрация пыли в воздухе вблизи источника K_2 ; интенсивность пылеоседания K_3 . Все неорганизованные источники при строительном производстве разделили на 4 группы в зависимости от значения критерия I_{Π} , (0–3), вычисляемого по формуле

$$I_{\Pi} = K_1(K_2 + K_3), \quad (1)$$

при $I_{\Pi} = 0$ – не пылящие процессы, при $I_{\Pi} = 1-2$ – средне пылящие процессы, $I_{\Pi} = 3-4$ – умеренно пылящие процессы, $I_{\Pi} = 5$ и более – сильно пылящие процессы
таблица 2.

Таблица 2 – Уровни пылевыведения при производстве различных строительных работ

Наименование работ	Параметры пылящих процессов			
	K_1	K_2	K_3	Группа
Земляные	1	3	3	сильно пылящие
Штукатурные	1	3	2	сильно пылящие
Изоляционные	0	1	1	слабо пылящие
Опалубочные	0	1	0	не пылящие
Возведение лесов и подмостей	1	0	0	слабо пылящие
Арматурные	0	0	0	не пылящие
Монтажные	0	1	0	слабо пылящие
Каменные	1	1	0-1	средне пылящие
Устройство полов и покрытий	1	2	1	умеренно пылящие
Очистка территории	1	2	3	сильно пылящие
Отделочные	1	3	3	сильно пылящие
Малярные	1	0	0	слабо пылящие
Бетонные	1	3	3	сильно пылящие
Кровельные	1	1	0	средне пылящие

Исследования, проведенные в разное время, показали, что наиболее удачное представление дисперсного состава строительной пыли на вероятностно-логарифмической сетке, рисунок 2.

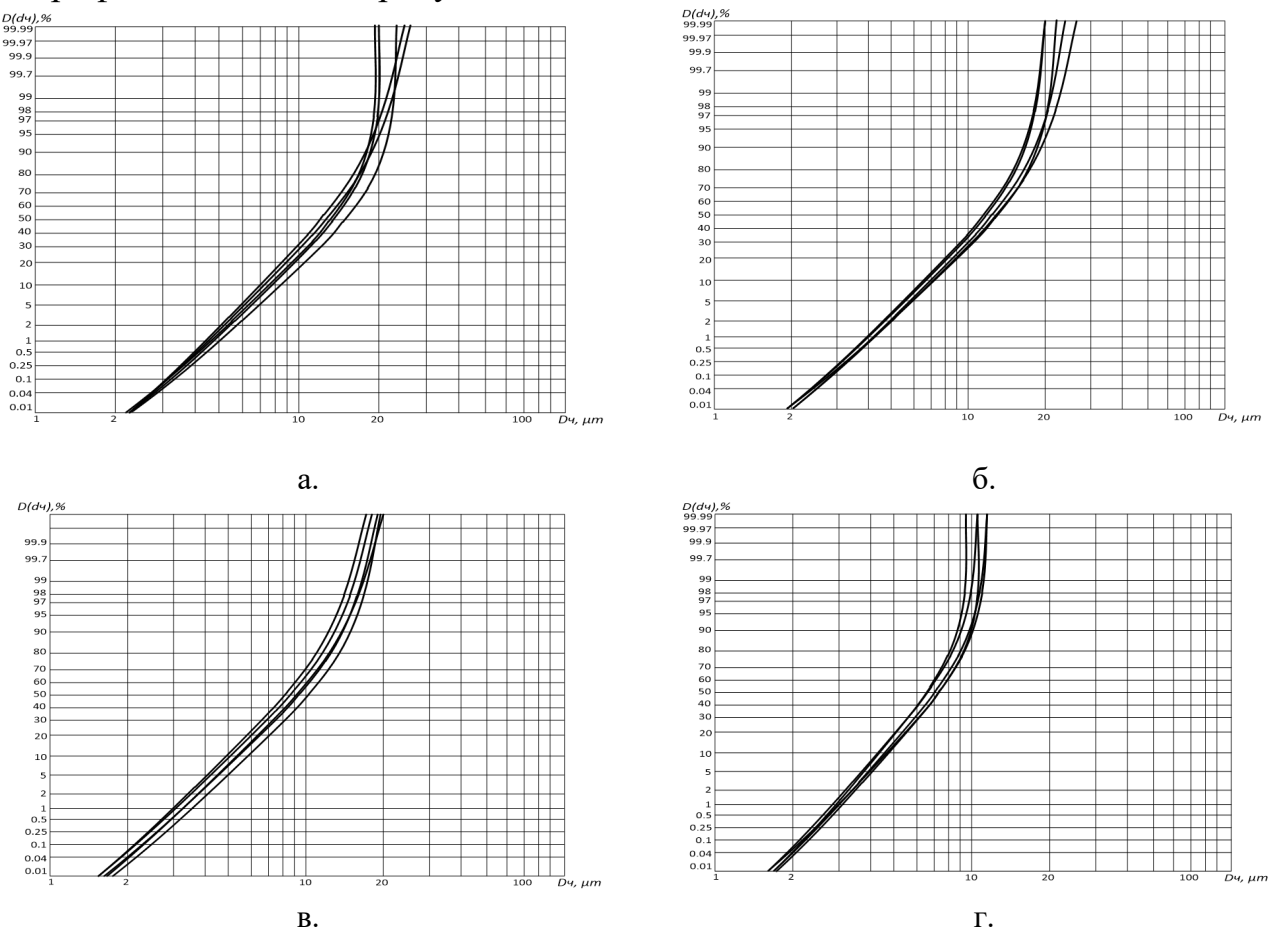


Рисунок 2 – Интегральные функции распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам по уровню пылевыведения строительных процессов: а – сильно пылящие б – умеренно пылящие; в – средне пылящие; г – слабо пылящие.

Анализ дисперсного состава и особенностей распространения пыли в воздушной среде на исследуемых объектах в зоне точечной застройки в Ростове-на-Дону представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты дисперсного состава пыли в воздухе зоны точечной застройки, (d_v), %

PM _{0,5}		PM ₁		PM _{2,5}		PM ₅		PM ₁₀	
лето	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима
0,2-0,5	0,7-2	0,4-0,9	1,4-4	2-3	3-8	15-22	18-27	51-80	57-70

В рамках исследования распространения пылевых выбросов на строительной площадке и близлежащей территории было выполнено детальное изучение вертикального распределения пыли при пылевыделениях во время точечного строительства.

Проведенные замеры характеристик мелкодисперсной пыли PM_{0,5}-PM₁₀ подтвердили тенденцию к уменьшению концентрации пыли с ростом высоты. В таблице 4 указано среднее число и диапазоны изменения количества частиц в объеме 1 см³ на разных высотах для зимнего и летнего периодов, минимальные и максимальные значения количества частиц. В таблице 5 приведены минимальные, средние и максимальные значения частиц в объеме 1 см³ на разных высотах для различных диапазонов PM_i. При этом измерения, проведенные на этих же высотах (этажах) во время реализации отделочных работ, показали, что влияние на запыленность в зоне проведения работ у технологического процесса (отделочные работы) влияют неизмеримо в большей степени с учетом фоновое загрязнение согласно действующих документов. В летнее время число частиц по высотам показывает высокое значение у поверхности земли, которая быстро падает с увеличением высоты и не демонстрирует значительных колебаний. Зимой, при активной конвекции, установить четкую зависимость между высотой и концентрацией пыли сложнее: у земли пыли меньше, и её концентрация уменьшается медленнее по сравнению с зимним периодом.

Таблица 4 – Сравнение содержания числа частиц PM_{0,5}–PM₁₀ в 1 см³ воздуха при строительных работах и их отсутствии

Высота, м	Летний период 2019 г.				Зимний период 2019/2020 гг			
	Содержание частиц пыли, 1/ см ³				Содержание частиц пыли, 1/ см ³			
	работы отсутствуют		с отделоч. Работами		работы отсутствуют		с отделоч. работами	
	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения
0,1	98	21-183	176	60-250	19	1-82	34	10-92
1	98	20-188	177	65-255	19	1-84	34	10-84
5	94	25-182	150	62-244	18	1-82	32	10-82
10	89	24-180	162	59-265	18	1-82	30	10-82
20	84	24-182	172	62-252	16	1-82	36	10-82
30	78	25-178	159	58-255	15	1-80	33	10-83
40	72	26-177	168	60-245	14	1-73	35	10-77
50	68	28-169	168	63-254	13	1-69	32	10-89
60	64	30-157	170	64-252	12	1-57	34	10-87
70	63	30-132	158	52-245	12	1-43	32	10-83
80	53	33-105	165	62-252	11	1-39	33	10-89

Таблица 5 – Сравнение содержания числа частиц PM_{0,5}–PM₁₀ в 1 см³ воздуха при строительных работах и их отсутствии

Высота, м	Число частиц в диапазонах PM _i – PM _{i+1}														
	0-PM _{0,5}			PM _{0,5} -PM ₁			PM ₁ – PM _{2,5}			PM _{2,5} -PM ₅			PM ₅ – PM ₁₀		
	мин. знач.	ср. знач.	макс. знач.	мин. знач.	ср. знач.	макс. знач.	мин. знач.	ср. знач.	макс. знач.	мин. знач.	ср. знач.	макс. знач.	мин. знач.	ср. знач.	макс. знач.
0,1	62	84	95	41	72	89	18	55	78	8	42	74	2	18	56
1	11	63	89	11	45	76	2	23	56	1	13	48	0	2	24
5	4	51	77	6	31	67	1	12	42	0	4	34	0	1	13
10	2	44	69	2	24	63	0	7	36	0	3	27	0	0	8
20	1	28	63	1	18	59	0	5	29	0	1	18	0	0	5
30	1	28	60	1	17	56	0	4	27	0	0	16	0	0	4
40	1	26	56	0	16	54	0	4	25	0	0	15	0	0	3
50	0	24	54	0	14	52	0	3	23	0	0	14	0	0	3
60	0	22	52	0	13	50	0	2	21	0	0	12	0	0	2
70	0	22	55	0	12	48	0	1	20	0	0	11	0	0	2
80	0	22	55	0	12	47	0	1	19	0	0	10	0	0	2

Наиболее высокая концентрация загрязняющих веществ в воздухе приходится на высоту 1-1,5 м и составляет около 2,5 ПДКр.з. Уровень загрязнения 1-3-го этажей 25-этажных домов, расположенных вблизи от рабочего места производимых работ – до 35-50 м составляет 0,5 ПДКр.з. На высоте 33 м – уже 0,2 ПДКр.з. На высоте более 33 м пылевое загрязнение – от 0,1 до 0,01 ПДКр.з. Различие загрязнения нижних этажей зданий 1 эшелона и верхних этажей высотных зданий, расположенных в районе строительства, составляет два порядка.

Пылевые частицы размером свыше 10 мкм достаточно быстро оседают. Частицы, размером 0,25-10 мкм медленно оседают. Ультрамикроскопическая частица размером менее 0,25 мкм имеет скорость оседания (витания) близкую к 0, поэтому подчиняется законам броуновского движения.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию параметров выбросов пыли в атмосферу при точечном строительстве.

Исследование дисперсного состава пыли на строительной площадке показало значительные колебания в размерах частиц, превышающие статистические погрешности измерений. Эти колебания вызваны не только условиями работы, но и метеорологическими условиями, например, влажностью и скоростью ветра. Поэтому при изучении дисперсного состава частиц пыли, образующихся во время строительных работ, целесообразнее использовать модели, основанные на случайных процессах, а не на строгих детерминированных подходах. Наблюдаемые изменения в дисперсном составе пыли отражают естественные причины, а не ошибки при измерениях.

На рисунке 3 представлены примеры интегральных функций распределения дисперсного состава пыли, полученные во время исследования концентрации пыли в одной контрольной точке жилой зоны вблизи точечного строительства. Изучаемую функцию $D(d_v)$ рассмотрим, как случайный процесс, изменяющуюся в

некотором диапазоне значений для каждого аргумента $D(d_q)$. Эти функции в каждом конкретном измерении выступают в качестве детерминированных траекторий или реализаций случайного процесса для $D(d_q)$. Основываясь на анализе данных о дисперсном составе пыли в одной контрольной точке, отобранных 64 проб при одной технологической операции – подготовка бетонной смеси и устройство фундамента, построим случайные функции плотности распределения значений $D(u) = 2,5$ мкм и $D(u) = 10$ мкм, рисунок 4, т.е. в точках $D(u) = 2,5$ мкм и $D(u) = 10$ мкм, которые являются характерными размерами частиц анализируемой пыли.

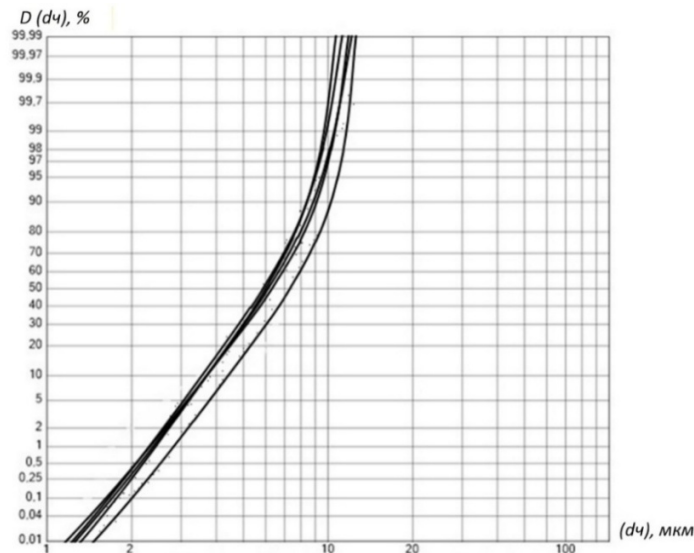


Рисунок 3 – Диапазон изменения интегральной функции распределения массы частиц пыли по эквивалентным диаметрам в воздухе жилой зоны при технологической операции – устройство фундамента.

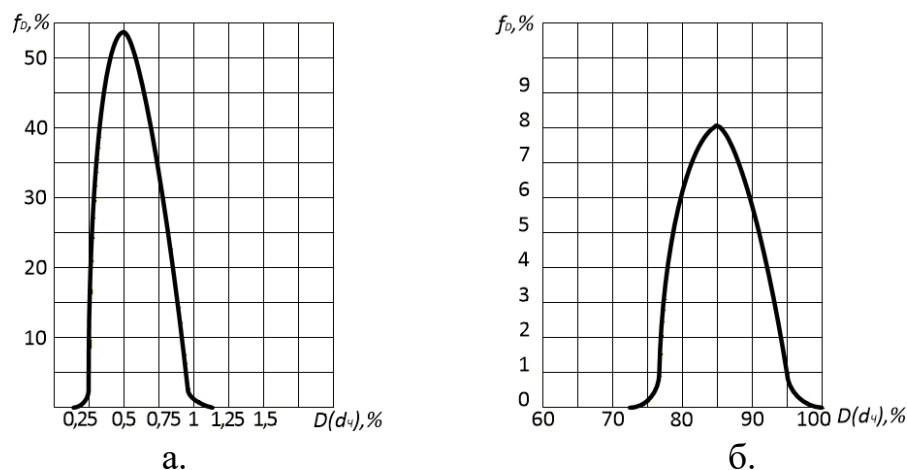


Рисунок 4 – Дифференциальная функция распределения значений интегральной функции распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в воздухе близлежащей территории к точечной застройке при фиксированных диаметрах частиц: а – $d_q = 2,5$ мкм; б – $d_q = 10$ мкм при технологической операции – устройство фундамента.

В воздушной среде одним из ключевых показателей состояния пылевой загрязненности является интегральная концентрация пыли $C(d_q)$. Этот показатель отражает общую массу частиц, размер которых не превышает d_q . Его можно описать как случайную функцию, рисунок 5.

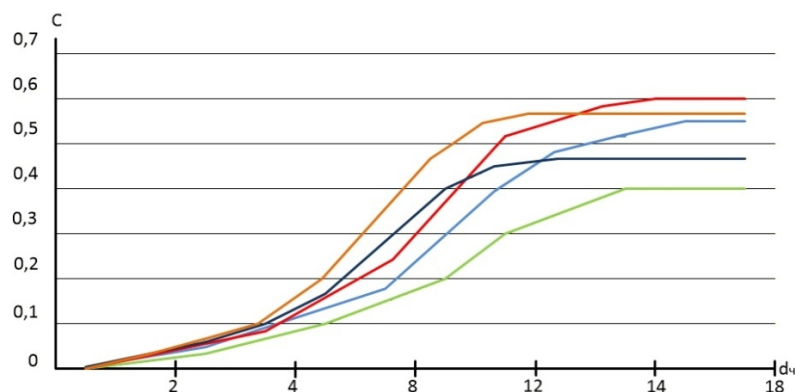


Рисунок 5 – Функция интегральной концентрации пыли, отобранной в воздухе различных зон строительных работ.

Для анализа дисперсного состава пыли используется подход, где $C(d_q)$ представляется как результат умножения случайной общей концентрации пыли C_0 на функцию прохода $D(d_q, \omega)$, которая изменяется в зависимости от разных переменных. Такой способ оценки приобретает значительную важность при работе с измерениями уровней частиц PM10 и PM2,5, воспринимаемых как переменные со случайным характером:

$$C(d_q) = C_0 D(d_q, \omega) \quad (2)$$

Применение этого подхода позволяет рассчитывать вероятностные характеристики распределения пыли в атмосфере, определить другие важные параметры, которые нужны для оценки уровня загрязнения воздуха твердыми взвешенными веществами. Особое значение приобретает расчет вероятности превышения нормативов, как для общей концентрации, так и для мелкодисперсной пыли.

Проведенные экспериментальные и натурные исследования позволили получить для каждого технологического процесса дифференциальную функцию изменения значений функции прохода при фиксированных $D(d_q)$ и рассматривать каждую интегральную функцию распределения массы частиц по диаметрам как случайный процесс. Аналогично как случайный процесс можно рассматривать интегральную концентрацию $C(d_q) = c_0 \times D(d_q)$, где c_0 – случайная величина общей концентрации пыли, а d_q – эквивалентный диаметр.

Проведены сравнения методов построения интегральных функций частиц по диаметрам на основании интегральной функции прохода, проанализированы семь вариантов функций аппроксимации: однозвенные, двухзвенные и трехзвенные сплайны. Измерения проводились при технологической операции – устройство фундамента с расположением бетоноузла на строительной площадке параллельно в трех контрольных точках для определения дисперсного состава пыли на расстоянии 5 м от бетоноузла, 10 м от места укладки бетона и 30 м от жилой зоны. Исследование дисперсного состава пыли при устройстве фундамента охватило 100 единиц выборки, определены критерии согласия Пирсона и Колмогорова по результатам исследования пыли на строительной площадке и на близлежащей территории, таблицы 6 и 7.

Таблица 6 – Результаты расчета проверки достоверности по критериям для пыли в воздухе на строительной площадке

Типы аппроксимации	Варианты функций аппроксимации	Результаты проверки достоверности по критериям, %			
		Колмогорова λ		Пирсона, χ^2	
		подтверждается	не подтверждается	подтверждается	не подтверждается
Однозвенный сплайн	Прямая	55	45	30	70
Двухзвенный сплайн	Прямая + прямая	70	30	65	35
	Прямая + парабола	50	50	55	45
	Прямая + гипербола	80	20	75	25
Трехзвенный сплайн	Прямая + прямая + прямая	65	35	65	35
	Прямая + прямая + гипербола	90	10	90	10
	Прямая + парабола Гипербола	100	0	95	5

Таблица 7 – Результаты расчета проверки достоверности по критериям для пыли в воздухе близлежащие территории

Типы аппроксимации	Варианты функций аппроксимации	Результаты проверки достоверности по критериям, %			
		Колмогорова λ		Пирсона, χ^2	
		подтверждается	не подтверждается	подтверждается	не подтверждается
Однозвенный сплайн	Прямая	50	50	30	70
Двухзвенный сплайн	Прямая + прямая	65	35	65	35
	Прямая + парабола	70	30	65	35
	Прямая + гипербола	80	20	75	25
Трехзвенный сплайн	Прямая + прямая + прямая	65	35	65	35
	прямая + прямая + гипербола	90	10	90	10
	прямая + парабола + гипербола	100	0	100	0

Согласно данным таблиц 6 и 7, применение трехзвенного сплайна (прямая + парабола + гипербола) для аппроксимации интегральной функции прохода дает наиболее точные результаты, что свидетельствует о том, что распределение размеров частиц соответствует логарифмически-нормальному закону.

Результаты дисперсного состава исследуемых проб частиц показали, что размер частиц в жилой зоне более мелкие, чем на строительной площадке. Действие закона А.Н. Колмогорова распространяется на отдельных участках для частиц крупнее 1 мкм.

В четвертой главе разработаны технические мероприятия по борьбе с пылевым загрязнением на строительной площадке.

Автором была разработана модель пылезащитного экрана, конструкция которого устроена таким образом, чтобы оптимально подходить к габаритам строительных лесов или секций ограждающих конструкций забора. Эти экраны обрабатываются специальным химическим раствором, разработанным автором, который усиливает его способность адсорбировать пыль, патент №192629, рисунок 6. Эффективность модели особенно заметна при применении ее в процессе реализации наиболее пылящих процессов – демонтажные работы и работы нулевого цикла. В конструкции пылезащитного экрана должна использоваться рогожка или нержавеющей сетка с ячейками $0,8 \times 0,8$ мм d-0,25 мм тканной MESH 2-08-025 согласно ГОСТ 3826-82 (1000 ячеек на 100 см^2 , вес сетки – $0,3 \text{ кг/м}^2$, продольная прочность на разрыв – $19,3 \text{ кН}$). Химический состав раствора для смачивания экрана определялся на основании экспериментальных исследований на строительной площадке.



Рисунок 6 – Устройство пылезащитного экрана: 1 – станина; 2 – рогожка; 3 – штапики; 4 – хомуты; 5 – болтовые соединения; 6 – гайка; 7 – уголки.

Химический состав раствора для смачивания на 100 г: 3% водный щелочной раствор силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$, $\rho = 1,4\text{--}1,6 \text{ г/см}^3$ – 50 г; хлористый кальций CaCl_2 , $\rho = 2,15 \text{ г/см}^3$ – 20 г; угольная кислота H_2CO_3 , $\rho = 1,668 \text{ г/см}^3$ – 30 г. Время твердения раствора – 40 минут. В результате твердения образовывалось гелеобразное вещество, которое в процесс твердения обеспечивало удерживание частиц пыли, производимых от строительного производства. Для оценки

способности раствора удерживать частицы пыли, автором работы были проведены натурные исследования. Монтаж конструкции пылезащитного экрана был произведен на строительной площадке в г. Ростове-на-Дону. Экран устанавливался с северной и западной стороны на ограждающие конструкции, так как в период исследования данные направления ветра были преобладающими. В период испытаний каждые 3 часа производилось нанесение раствора струей из опрыскивателя. Гелеобразный раствор аккуратно удалялся механическими движениями при помощи щетки с металлическим ворсом.

Для изучения пылезащитного экрана автор ежедневно измеряла концентрацию пыли до и после экрана проводилось ручным счетчиком частиц Handheld 3016 IAQ. Скорость набегающего воздушного потока измерялась анемометром Venetech GM816. Контрольные точки замеров показаны на рисунке 7 (а). Схема исследования эффективности пылезащитного экрана представлены на рисунке 7 (б). Исследования проводились если скорости преобладающего ветра v_1 (северного) и v_2 (западного) направлений, настигающие экран в период исследования не превышали 7 м/с .

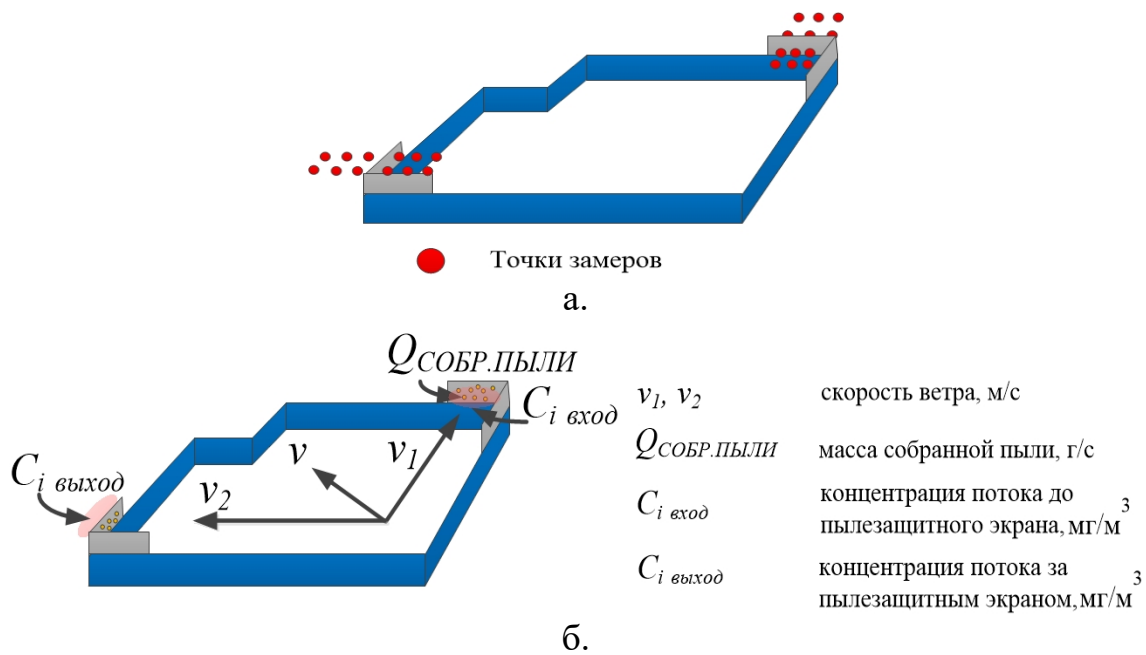


Рисунок 7 – Схема исследования: а – схема точек замеров; б – схема исследования эффективности пылезащитного экрана.

Перед началом выполнения пылящей операции, например, выравнивание площадки, бульдозером, пылезащитный экран покрывался химическим составом из расчета 100 г на 1 м² каждый час рабочей смены.

В период исследования основной объём выбросов пыли со строительной площадки оседал на улавливающем экране. Оценка объема осевшей пыли осуществлялась как отношение собранной пыли к расходу пыли в набегающем потоке выбора определенной области

$$\eta_{\text{ЭФ.П.ЭК.}} = \frac{Q_{\text{СОБР.ПЫЛИ}}}{v_i \times C_{i \text{ входа}} \times S_i}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{СОБР.ПЫЛИ}}$ – масса собранной пыли, г/с; v_i – скорость ветра в i -том направлении; $C_{i \text{ входа}}$ – концентрация пыли в набегающем на экран потоке в i -том направлении ветра, мг/м³; S_i – площадь экрана, в который направлен поток воздуха, м².

Результаты испытаний приведены в таблице 8. Применение пылезащитного экрана с нанесением химического раствора позволяет сократить выбросы пыли за пределы строительной площадки до 90 %. Эффект всасывания частиц внутрь раствора значительно усиливается при механическом перемешивании нижних его слоев с верхними слоями. В процессе монтажа разработанного пылезащитного экрана на строительные леса при, например, реставрационных работах, процент эффективности повышается еще больше, так как показатели скорости ветра здесь будут отсутствовать или критически малы, что свидетельствует о гарантированном сдерживании выбросов пыли при строительстве в стесненных условиях точечной застройки.

Таблица 8 – Результаты эффективности пылеулавливания при расходе раствора 100 г/1м²

Вид строительного процесса	Скорость ветра, м/с	Расход пыли в набегающем потоке, г/час	Интенсивность оседания пыли на экране, г/час	Эффективность пылеулавливания, %
Демонтажные работы	7	114,47	105,31	92
	7	105,31	95,83	91
	6	116,75	100,40	86
	3	108,74	92,42	85
	5	103,02	91,68	89
	6	113,52	103,30	91
Выравнивание площадки бульдозером	5	78,28	72,01	91
	4	76,53	65,81	86
	7	72,32	65,08	90
	7	77,55	69,79	90
	6	73,31	63,77	87
	6	77,64	65,99	85
Разработка грунта	2	91,52	82,36	90
	4	91,27	78,49	86
	6	92,74	81,66	90
	6	85,46	81,39	89
	7	80,55	81,49	90
	6	91,42	76,79	84
Планировка дна и откосов котлована	5	84,62	77,2	94
	5	92,48	79,53	86
	3	91,65	82,48	91
	4	90,67	78,88	87
	5	92,31	77,54	84
	5	91,49	75,93	83
Устройство подпорных стен котлована	7	86,65	81,45	94
	6	85,84	74,68	87
	7	82,16	73,94	90
	7	84,88	76,39	90
	5	86,56	75,30	87
	5	83,73	73,68	88
Забивка свай	3	78,48	63,56	81
	3	70,11	59,59	85
	4	72,66	63,21	87
	3	78,33	66,58	85
	4	71,43	61,42	86
	4	72,25	61,41	85
Опалубочные работы	3	63,44	55,82	86
	5	60,93	54,22	89
	5	63,24	56,91	90
	4	62,84	53,41	85
	5	62,55	53,79	86
	5	62,53	53,77	86

Эффективным средством для этого стала разработанная модель мокрого пылеулавливания, пушка пылеподавления, используемая в рабочей зоне строительного процесса, патент № 197551, рисунок 8.

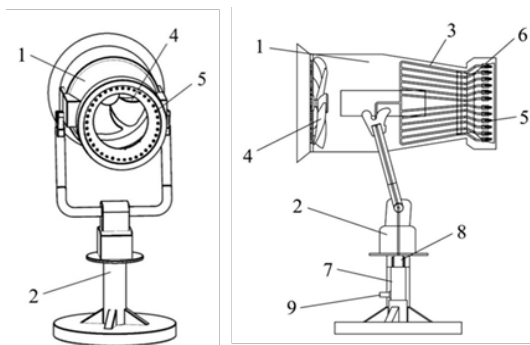


Рисунок 8 – Модель пушки туманообразования: 1 – корпус; 2 – станина; 3 – система водоснабжения; 4 – вентилятор; 5 – форсунки; 6 – источник электромагнитного поля; 7 – пневмонасос; 8 – фильтр; 9 – коннектор с источником воды.

В основе работы разработанной установки для подавления пыли лежит инновационное дополнение – встроенные источники постоянного электромагнитного поля, что значительно усиливает способность устройства привлекать к воде частицы пыли в том числе в диапазоне от PM_{0,5} до PM₁₀.

В рамках исследования в период с января по июль 2021 года проведены испытания установки пушки пылеподавления для оценки эффективности использования влажного способа для снижения концентрации пыли.

В рамках исследования, направленного на анализ уровня пыли в атмосфере на строительных площадках при использовании оборудования для пылеподавления в процессе резки газоблоков на открытой территории, было разработано регрессионное уравнение

$$\frac{C(x_1, x_2)}{ПДК} = \exp \{1.70 - 0.37x_1 + 0.29x_2 - 1.67x_1^2 - 0.42x_2^2 + 0.22x_1x_2\}. \quad (4)$$

Это уравнение позволяет вычислять концентрацию пыли, выраженную в отношении к предельно допустимым концентрациям (ПДК), исходя из расстояния до источника пыления. На основании анализа данных мы получили графики изменения уровня концентрации пыли в воздухе при использовании пушки пылеподавления, отражающих регрессионную зависимость при диапазоне скоростей воздуха от 2,1 до 3,2 м/с, рисунок 9.

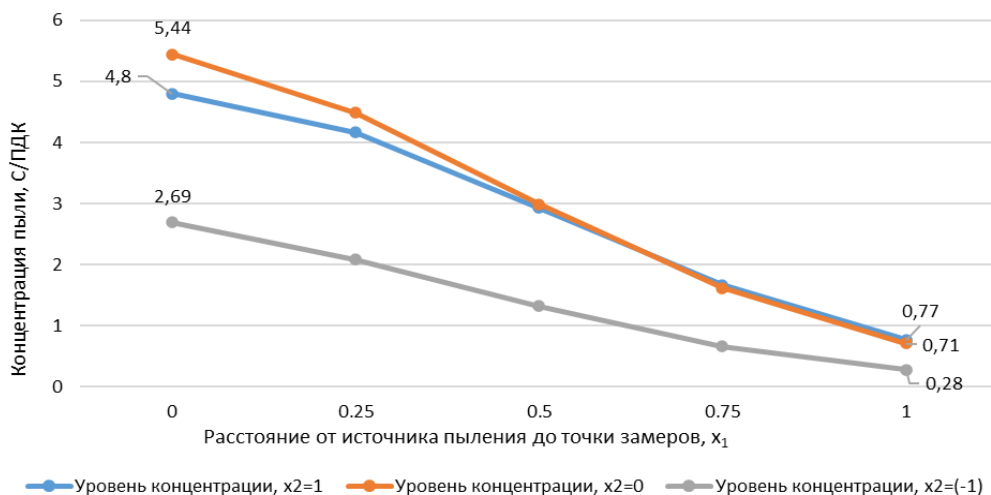


Рисунок 9 – Исследование регрессионных зависимостей концентрации пыли в воздухе в процессе резки газоблоков с использованием пушки пылеподавления на открытом воздухе.

В ходе замеров в контрольных точках концентрации пыли каждые 5 м в процессе работы пушки от места резки газоблока было обнаружено, что, когда значение x_1 составляет 0,75, концентрация частиц достигает предельно допустимых концентраций (ПДК), подтверждая это коэффициентом детерминации $r_2=0,95$, что указывает на высокую степень соответствия полученных данных. В рамках анализа влияния различных факторов, таких как местоположение источника пыли, скорость и влажность воздуха, на концентрацию взвешенных частиц во время резки газоблоков, было выявлено, что использование пушки пылеподавления значительно снижает уровень пыли. Эта технология особенно эффективна в стесненных городских условиях, позволяя достичь ПДК в помещении на расстоянии до 7 м (от 5,2 ПДК в рабочей зоне до 0,95 ПДК) и на открытом воздухе – до 15 м от установки (от 5,44 ПДК в рабочей зоне до 0,77 ПДК).

В связи с увеличением объемов точечного строительства, включая возведение новых зданий и обновление застройки, возникает острая потребность в эффективном использовании ограниченных ресурсов природы и их функциональном расширении. Применение экологически чистых и экономически выгодных архитектурных решений, таких как системы зеленых крыш, стало одной из ключевых стратегий для дополнения убывающих природных запасов. Это способствует сокращению строительной пыли и улучшению условий жизни городского населения, внося свой вклад в рациональное использование природных ресурсов.

Для исследования влияния осаждения пыли на горизонтальной плоскости растительностью был проведен эксперимент при возведении жилого микрорайона «Красный Аксай» в г. Ростове-на-Дону. На стилобатном этаже, как элемент благоустройства, была оборудована система зеленой кровли. На расстоянии 10 м от забора строительной площадки были посажены травянистые растения площадью 6 м² (1 м² на каждое растение), характеризующиеся высоким уровнем поглощения пыли на основании предыдущих исследований и характерные для климата Ростовской области, рисунок 10.



Рисунок 10 – Травянистые растения, высаженные на зеленой кровле для снижения пылевого воздействия: 1. Полевица побегоносная (*Agrostis stolonifera*); 2. Лаванда узколистная (*Lavandula angustifolia*); 3. Овсяница красная (*Festuca rubra*); 4. Подорожник ланцетный (*Plantago lanceolata*); 5. Очиток белый (*Sedum album*); 6. Овсяница сизая Фестина (*Festuca festina*).

В течение вегетационного периода с мая по сентябрь, во время строительства стилобатной части здания и выполнения каменно-монтажных работ, производилось 10 измерений уровня пыли дважды в неделю, каждый раз в течение 120 минут. Каждый вид растений занимал площадь в 6 м², формируя общую экспериментальную зону в 36 м². Результаты, отображающие

эффективность оседания частиц пыли на листьях изучаемых растений, представлены на рисунке 11.

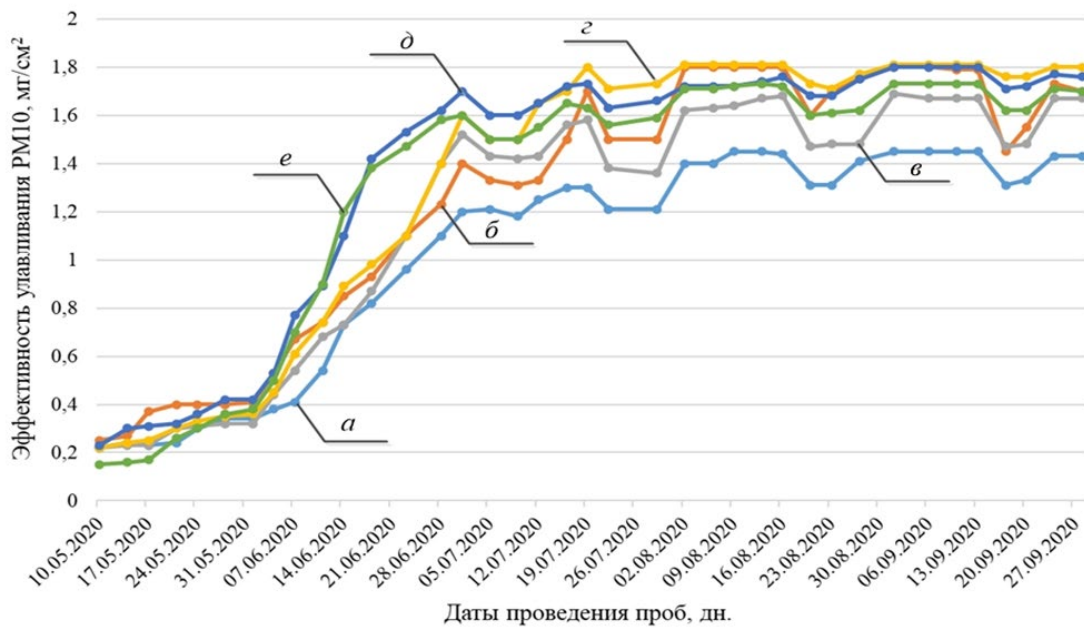


Рисунок 11 – Плотность пылеоседания PM10 растениями в зоне точечной застройки: *а* – Полевица побегоносная (*Agrostis stolonifera*); *б* – Лаванда узколистая (*Lavandula angustifolia*); *в* – Овсяница красная (*Festuca rubra*); *г* – Подорожник ланцетный (*Plantago lanceolata*); *д* – Очиток белый (*Sedum album*); *е* – Овсяница сизая Фестина (*Festuca festina*).

Исследование показало, что наличие растений оказывает значительное влияние на качество воздуха во время строительства, особенно при доминирующем восточном ветре со скоростью 3-5 м/с и влажности воздуха от 30% до 60%. В зоне с растительностью отмечалось снижение содержания частиц PM10: уровень падал на 10 % при влажности 30-35% и на 20% при влажности 35-60%. На расстоянии 10 м от зеленой зоны, по сравнению с ближайшей строительной площадкой, концентрация частиц уменьшалась на 15% при влажности 30-35% и до 30 % при влажности 35-60%.

На основании исследования автора установлено, что зеленая кровля может использоваться не просто для поглощения пыли напрямую, а как барьер, защищающий окружающую территорию от пыли, образующегося от строительных процессов.

В пятой главе разработаны организационные решения по повышению экологической безопасности воздушной среды городской территории.

Пылевые выбросы оказывают негативное воздействие на экосистему городской среды, включая население, проживающие на конкретной территории. Следовательно, логично рассчитать оценку ущерба от точечной застройки для рассматриваемой территории, выраженную через суммарный показатель I_j , чтобы понять влияние выбросов от объекта точечной застройки d в период выполнения строительных работ t . Для достижения поставленной задачи автором проведен анализ характеристик, подсчитывающих количество факторов, влияющих на образование пылевых выбросов p (концентрация частиц PM2,5, концентрация частиц PM10, общая концентрация пылевого загрязнения), вызывающих превышение ПДК на j – участках на территории существующей жилой застройки S за период T , в контрольных точках s . В нашем случае p имеет значения 0-3.

С применением данной формулы мы можем вычислить наиболее «грязный технологический процесс» с превышение концентрации загрязняющих веществ, основываясь на его концентрации p_j с которым ассоциированы контрольные точки сна прилегающей территории к точечной застройке

$$I_j = \frac{1}{T \times S} \int_0^T dt \int_{S_j}^T p_j(s) dS. \quad (5)$$

Автором предлагается внедрить алгоритмы машинного обучения в мониторинг и прогнозирование уровня загрязнения воздуха от строительных площадок, особенно мелкодисперсной пыли PM_{2,5}. Для реализации этой задачи были выбраны модели машинного обучения ARIMA, EMA, Prophet, Random Forest, SVM, XGBoost. Для тестирования моделей машинного обучения в прогнозе среднесуточной концентрации пыли на примере PM_{2,5} автором использовал данные собственных натурных измерений концентрации пылевого загрязнения на строительной площадке точечной застройки и близлежащие территории по ул. Магнитогорская 2А, г. Ростов-на-Дону. Сбор информации о концентрации PM_{2,5} проводился 1-6 июня 2021 г микроскопическим методом и с использованием портативного прибора Handheld 3016 IAQ. Диапазоны изменения параметров воздушной среды на стройплощадке и на близлежащих территориях с подветренной стороны приведен в таблице 9. Дополнительные замеры, проведенные 7 и 8 июня, позволили проверить точность прогноза среднесуточной концентрации PM_{2,5} жилой зоне на основе ансамблевых методов в прогнозировании.

Таблица 9 – Диапазоны изменения параметров воздушной среды при замерах концентрации PM_{2,5} в зоне точечной застройки

Концентрация PM _{2,5} в контрольных точках, мг/м ³			Относительная влажность воздуха, %			Температура, °С		
Диапазон	Средн. знач.	Отклон.	Диапазон	Средн. значен.	Отклон.	Диапазон	Средн. значен.	Отклон.
Строительная площадка								
0,17-1,85	0,88	0,12	40-60	45	14	25-33	28	4
Жилая зона вблизи строительной площадки								
0,08-0,75	0,51	0,12	40-60	45	14	25-33	28	4

Процесс включал 4 этапа: сбор и обработка данных, подготовка данных к моделированию, использование расчетной модели для прогнозирования, оценка прогноза. Все модели реализованы с использованием языка программирования «R» и программного пакета «Modeltime», который генерировал почасовые показатели концентрации PM_{2,5}, температуры и влажности, объединяя измерения уровня пыли и метеорологические данные. Оценка прогноза ансамблевых моделей представлена на рисунке 12.

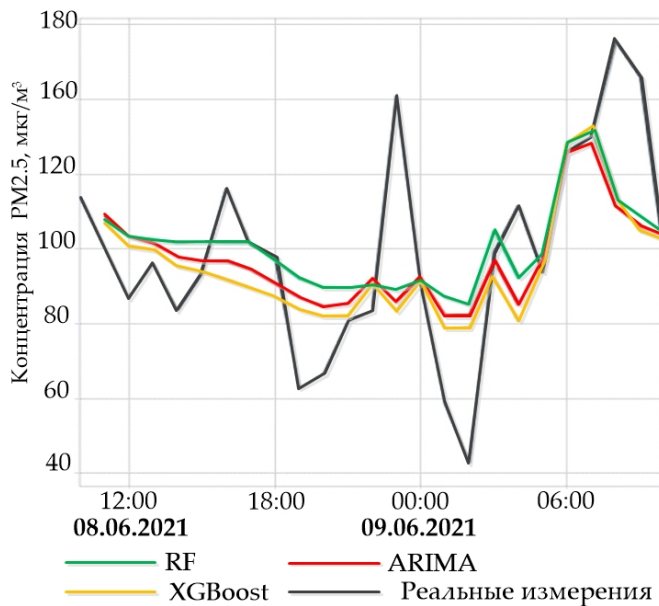


Рисунок 12 – Прогнозирование концентрации PM_{2,5} с помощью ансамблевой модели.

По результатам оценки видно, что модель XGBoost дает наименее точный прогноз. Применение ансамблевых моделей значительно повышает точность прогноза среднесуточной концентрации частиц PM_{2,5} в воздухе строительной площадки. Надежные прогностические модели могут стать полезным инструментом для выявления факторов, влияющих на концентрацию частиц PM_{2,5}. В целом применение алгоритмов машинного обучения в

прогнозировании среднесуточной концентрации частиц PM_{2,5} показали эффективные результаты, несмотря на применение в расчетах только метеорологических показателей.

Инструментом сбора информации об анализе и сборе данных о пылевом загрязнении могут выступать системы ГИС (геоинформационные системы), обеспечивающие временной и пространственный анализы данных мониторинга пыли на городской территории, что способствует выявлению скрытых зависимостей, которые не всегда заметны при стандартном изучении таблиц. Это позволяет получить всестороннюю оценку городской территории, включая аспекты безопасности для его жителей.

Для мониторинга пылевого загрязнения городских территорий автором разработан слой в геоинформационной системе который с помощью программы ArcGIS Online позволяет провести оценку текущего состояния общей запыленности и концентрации PM_{2,5} и PM₁₀, вероятность превышения ПДК, длительность превышения ПДК в воздушной среде на территории близлежащей, до 100-200 м, к стройплощадке, рисунок 13.

Для понимания влияние строительных процессов, особенно в условиях точечной застройки, на повышение пылевого загрязнения атмосферы в густонаселенных городских территориях, был проведен сводный расчет пылевого загрязнения атмосферного воздуха, выделяемого при точечном строительстве в Ростове-на-Дону. Расчетное моделирование проводилось Научно-методическим центром по экологическому моделированию, прогнозированию и оценкам ФГБУ «ВНИИ Экология» с использованием расчетного комплекса «Эколог-город», созданный компанией «Интеграл». Проведенный комплексный анализ показал превышения загрязнения воздуха, включая пыль, частицы PM₁₀ и другие взвешенные вещества, особенно в периоды высокой активности строительных работ, учитывая расположения строительной площадки в жилой зоне плотной городской застройки, рисунок 14.

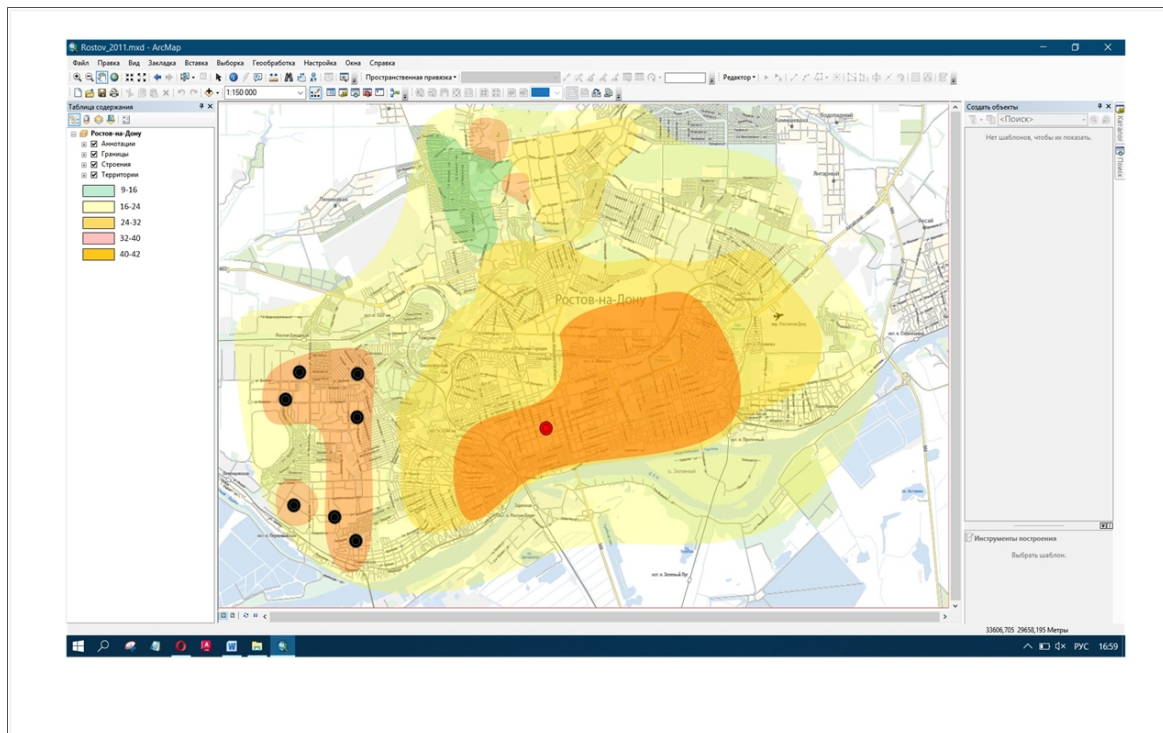


Рисунок 13 – Определение зоны влияния точечной застройки. Оценка пылевого загрязнения воздушной среды территории до начала строительства.

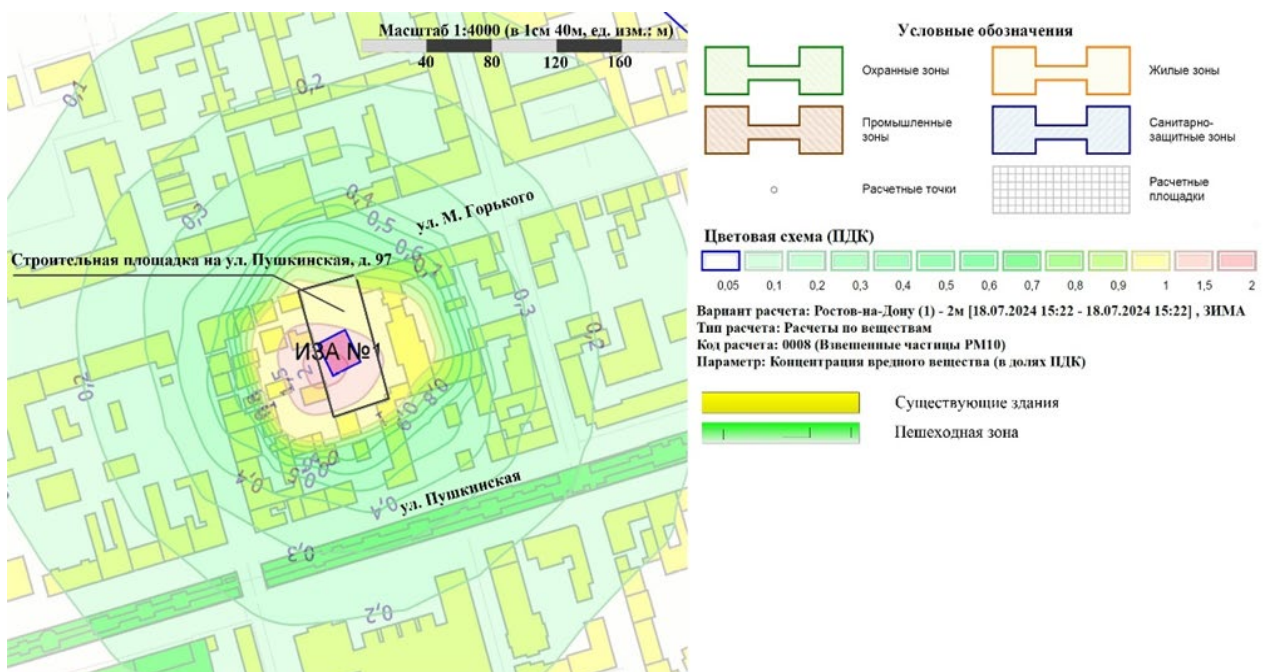


Рисунок 14 – Результаты сводного расчета пылевых выбросов частиц PM10 с учетом точечной застройки.

На основании проведенного исследования можно отметить, что на территории точечной застройки, в особенности в зоне выполнения работ, наблюдается значительное превышение норм пылевого загрязнения. Это влияние ощущается в радиусе до 40 м от источника загрязнения. Отмечается также, что интенсивность распространения пыли может варьироваться в зависимости от сезонных изменений направления ветров. Например, в Ростове-на-Дону замечена тенденция к преобладанию западных ветров зимой и восточных летом, что может влиять на распределение пылевого загрязнения на строительной площадке.

Вблизи зоны строительства, расположенной на расстоянии до 80 м, наблюдается повышение концентрации пыли в атмосфере, достигающее до 1,5 раза выше нормативно допустимых концентраций, независимо от направления ветра. Это указывает на то, что жители, проживающие поблизости, подвергаются влиянию загрязнения воздуха пылью в течение всего срока строительства. Однако, на удалении в 120 м от строительного объекта, концентрации пыли в воздухе снижается до нормы, с учетом фоновой концентрации пыли в воздухе городской среды.

Очевидно, что стесненность городской застройки способствует тому, что пыль, возникающая в ходе строительства, воздействует на соседние здания, включая жилые дома, офисы, коммерческие и общественные здания. Благодаря моделированию пылевого загрязнения от точечного строительства с помощью сводных расчетов, возможно, точно оценить, насколько серьезно воздействуют строительные работы в больших городах на концентрацию пыли в атмосфере. Это, в свою очередь, позволяет не только понять масштаб проблемы, но и разработать эффективные стратегии для уменьшения такого вида загрязнения.

Проектирование и строительство объектов в стесненной городской застройке уникально и требует больших вложений и времени, а также дополнительных трудностей из-за близости к жилым зданиям. Каждый этап строительства имеет риски, которые могут вызвать серьезные экологические нарушения.

Исходя из анализа данных о загрязнении воздуха частицами PM_{2,5} и PM₁₀, возникающими в результате строительных работ, автором была разработана методология проведения экологического риск-анализа влияния этих частиц на городскую территорию, прилегающую к объектам точечного строительства. Для оценки применяется система индикаторов, которая помогает выявить степень загрязнения в районах активного строительного производства вблизи с жилыми зонами, рисунок 15.

Для анализа загрязнения PM_{2,5} и PM₁₀ применяются две группы показателей, включающие данные об их концентрации. Первая группа, включающая коэффициенты *Igeo*, *KP* и *Er*, целенаправленно определяют степень негативного воздействия присутствия PM_{2,5} и PM₁₀ в воздухе. Вторая группа показателей, состоящая из *PLI* и *RI*, оценивает степень загрязнения территории вокруг строительных объектов и оценивает связанные с этим риски для здоровья населения.

Применение сетевого моделирования представляет собой эффективный метод, который можно использовать для анализа и прогнозирования пылевых выбросов на строительных объектах. Этот метод позволяет оценить общий объем пыли, выделяемой в процессе строительства, определить максимальную и среднюю концентрацию пыли за день, а также проанализировать её распространение и выявить зоны, где концентрация загрязнения превышает допустимые нормы. Сетевое моделирование обеспечивает возможность планирования и оптимизации мероприятий по снижению пылевых выбросов на этапах проектирования и выполнения строительных работ.

	<p>Коэффициент геоаккумуляции I_{geo} – показатель оценки концентрации загрязнителя (химического элемента) C_i в образце и общей концентрации воздушной среды исследуемой территории C_{total}</p> $I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5 \times C_{total}} \right]$ <p>менее 0 – нет загрязнения 0-1 – незначительный 1-2 – умеренный 2-3 – умеренный или сильный 3-4 – сильный 4-5 – сильный или критичный более 5 – критичный</p>
	<p>Коэффициент загрязнения K_p – показатель отношения концентрации исследуемого химического элемента к общей концентрации данного элемента в воздухе исследуемой территории C_n</p> $K_p = \frac{C_i}{C_n}$ <p>менее 1 – низкий 1-3 – умеренный 3-6 – значительный более 6 – критичный</p>
	<p>Коэффициент экологического риска E_r дает оценку потенциальной экологической опасности загрязняющего вещества в определённой воздушной среде R</p> $E_r = \frac{R}{K_p}$ <p>менее 10 – низкий 10-20 – умеренный 20-40 – значительный 40-80 – высокий более 80 – очень высокий</p> <p>R: PM2.5=50, PM10=50</p>
	<p>Коэффициент экологической нагрузки PLI, который определяет степень изменения воздушной среды за счет суммарного негативного воздействия загрязнителей n</p> $PLI = (K_{p1} \times K_{p2} \times \dots \times K_{pn})^{1/n}$ <p>менее 0 – отсутствие 0-1 – допустимый более 1 – высокий</p>
	<p>Вероятность неблагоприятных последствий для окружающей среды городской территории RI</p> $RI = \frac{n}{N}$ <p>где n – число случаев превышения максимальной концентрации PM2.5 и PM10, N – общее число проб в период реализации строительного производства.</p> <p>$< 0,1 = < 10\%$ – слабовероятно $0,1-0,4 = 10-40\%$ – маловероятно $0,4-0,6 = 40-60\%$ – вероятно $0,6-0,9 = 60-90\%$ – весьма вероятно $> 0,9 = > 90\%$ – возможно</p>

Рисунок 15 – Система индикаторов для экологического риск-анализа влияния PM2,5 и PM10 на городскую территорию от точечной застройки.

В ходе строительных работ автор предлагает внедрить систему календарного планирования, которая включает в себя составление графика работ, учитывая объемы пылевых выбросов. Эта система позволит в любой момент оценить количество пыли, выделяемой в процессе строительства, и найти эффективные методы для уменьшения загрязнения.

При разработке плана строительных и монтажных работ на различных участках критически важно принимать во внимание показатели среднесуточной концентрации PM2,5 и PM10, которые выделяются в процессе выполнения работ в зависимости от метеорологических условий.

В дополнение к сетевой модели принято разрабатывать график учета удельного объема выбросов пыли при СМР, который включает в себя мониторинг и контроль за пылевыми выбросами в атмосферу на всех этапах стройки. Путем анализа эпюры, отображающей дневные объемы выбросов мелкодисперсной пыли PM2,5 и PM10, удастся оценить общую концентрацию загрязнения и, соответственно, принять необходимые меры для минимизации распространения пыли за пределы строительного участка. Этот подход позволяет не только следить за соблюдением предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих

веществ, но и адаптировать строительные процессы к текущим экологическим требованиям. Фрагменты модели и графика представлены на рисунке 16.

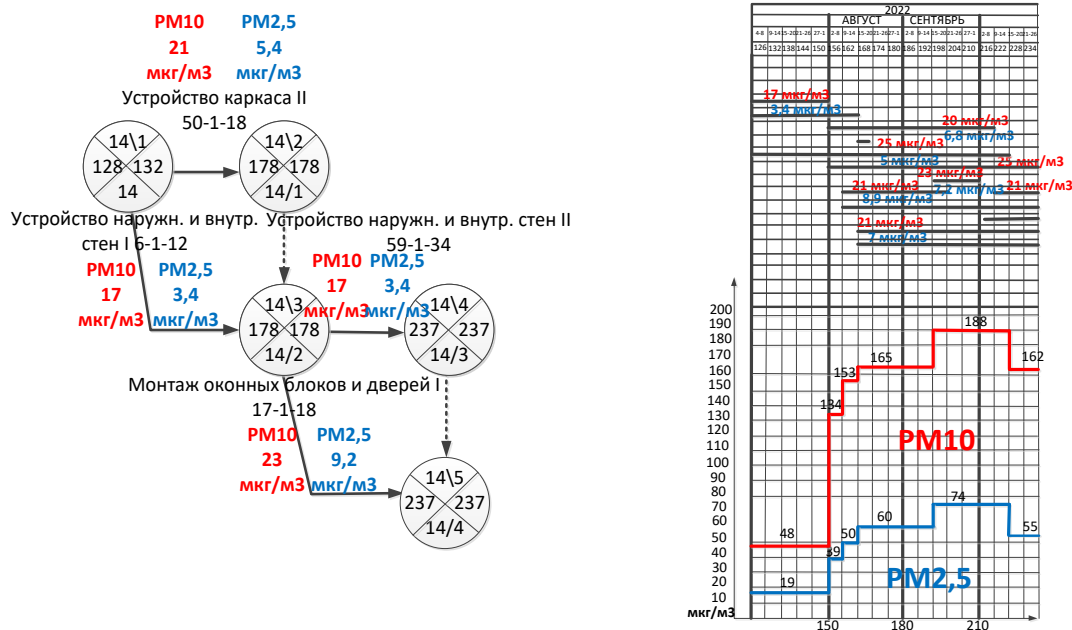


Рисунок 16 – Фрагменты сетевой модели и графика учета удельного объема выброса частиц и графика мелкодисперсной пыли PM2,5 и PM10 при СМР.

Анализируя площадь графика, затронутую пылевыми выбросами, можно определить объем загрязнения воздуха пылью во время строительства. Например, при возведении 11-этажного жилого комплекса на ул. Пушкинская, д. 97 в Ростове-на-Дону, общий объем выбросов мелкодисперсной пыли PM10 составляет 35,4 мг/с, PM2,5 – 12,4 мг/с, что в сумме дает 47,78 мг/с загрязнения.

В течение всего времени строительства объекта, максимальное значение концентрации PM10 на строительной площадке достигнет отметки в 7,76 мг/м³. В то время как в среднем за время строительства показатель PM10 будет равняться 0,65 мг/м³. Аналогично в контрольных точках на близлежащих территориях концентрация PM10 достигала 1 мг/м³ (3 ПДК), а в среднем – 0,36 мг/м³, что выше ПДК (ПДКм.р – 0,3 мг/м³). Из этого следует, что, придерживаясь предложенных методов и подходов в управлении строительством и производственных процессах, концентрации мелкодисперсной пыли остаются в рамках допустимых норм. Однако следует учитывать и фоновую концентрацию загрязнения воздуха территории.

Мониторинг за уровнем загрязнения воздуха пылью поможет скорректировать график работ на стройке. Анализ распространения пыли, учитывая скорость и направление ветров, позволит адаптировать действия для снижения пылевых эмиссий и контролировать области превышения нормативов загрязнения.

Для обеспечения точности в расчетах, автор предлагает создавать детальный план местности, который включает в себя как границы предоставленного участка для строительства, так и контрольные точки минимального воздействия пыли благодаря расчету коэффициента границы

санитарно-защитной зоны (K_{C33}), учитывающего метеорологические факторы, показатели фоновой концентрации пылевого загрязнения

$$K_{C33} = \frac{C_{PM2,5}}{ПДК_{PM2,5}} + \frac{C_{PM10} - C_{PM2,5}}{ПДК_{PM10}} + \frac{C_{ОБЩ} - C_{PM10}}{ПДК_{ОБЩ}}, \quad (6)$$

где $C_{PM2,5}$ – расчетная концентрация пылевого загрязнения частицами $PM_{2,5}$, $мг/м^3$; $ПДК_{PM2,5}$ – ПДК загрязняющего вещества $PM_{2,5}$, $0,16 \text{ мг/м}^3$; C_{PM10} – расчетная концентрация пылевого загрязнения частицами PM_{10} , $мг/м^3$; $ПДК_{PM10}$ – ПДК загрязняющего вещества PM_{10} , $0,3 \text{ мг/м}^3$; $C_{ОБЩ}$ – расчетная общая концентрация пылевого загрязнения, $мг/м^3$; $ПДК_{ОБЩ}$ – ПДК взвешенных веществ в атмосферном воздухе, $0,5 \text{ мг/м}^3$

Данные по граничным контрольным точкам воздействия пылевого загрязнения в определенный период времени возможно коррелировать с показателями концентрации на графике показателей пылевых выбросов объекта строительства, рисунок 17.

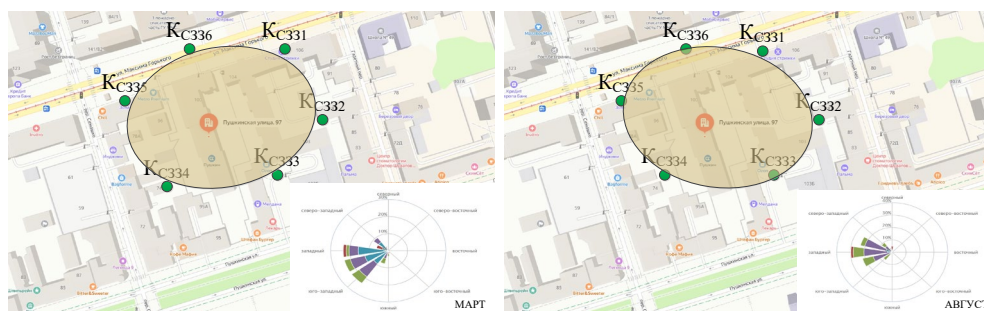


Рисунок 17 – Расчет контрольных граничных точек санитарно-защитной зоны пыли.

В **шестой главе** представлены результаты практической реализации проведенных исследований.

Разработаны принципы мониторинга воздушной среды в жилой зоне и на границе строительной площадки. Мониторинг включает контроль и прогнозирование исходного загрязнения и загрязнения атмосферы от строительства с использованием алгоритмов машинного обучения (ARIMA, EMA, Prophet, NN, Random Forest, SVM, XGBoost), комбинируемых в многомерные и ансамблевые модели. Они показали точность прогнозирования концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} на практике. Данные для обучения включают метеорологические условия (температура, влажность, скорость ветра) и удельные выбросы пыли из сетевой модели и графика, разработанных в составе рабочей документации на строительство объекта. Предложенные мероприятия рекомендованы к внедрению в проектно-сметную документацию АО институт «Ростовский Промстройинипроект» для строительства комплекса ядерной установки в Димитровграде Ульяновской области.

Получен патент на полезную модель «Пылезащитный экран» № 192629U1 (Патент на полезную модель № 192629 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/92, E04G 5/00. Пылезащитный экран: № 2019121222: заявл. 08.07.2019: опубл.

24.09.2019 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, Н. В. Коваль, А. А. Тутаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ), рекомендованный для применения при организации строительных площадок точечной застройки в городских условиях. При реконструкции здания вокзала в Иваново средняя скорость воздушного потока через экран составила $0,6 \pm 0,1$ м/с, концентрация пыли до экрана – $0,9 \pm 2$ мг/м³, после экрана – $0,7 \pm 0,15$ мг/м³, на расстоянии 10м – $0,4 \pm 0,1$ мг/м³. На основе исследований получен патент на полезную модель «Пушка пылеподавления» № 197551 (Патент на полезную модель № 197551 U1 Российская Федерация, МПК E21F 5/02. Пушка пылеподавления: № 2020101635: заявл. 17.01.2020: опубл. 13.05.2020 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, А. И. Кирюхин, А. В. Колесников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ). Испытания опытно-промышленной установки проводились при реконструкции вокзала в Арзамасе: выброс струи воды – 15м, насос – 0,75kW, давление воды – 80 Bar, средняя скорость воздушного потока – $0,6 \pm 0,1$ м/с, начальная концентрация пыли – $0,4 \pm 0,12$ мг/м³, после воздействия водяной струи с магнитной насадкой – $0,18 \pm 0,08$ мг/м³, снижение концентрации пыли на 50%.

Аналогичные испытания проводились в сентябре 2024 года при реконструкции производственного корпуса Литер «В» ООО "КЗ" Ростсельмаш" в г. Ростове-на-Дону, снижение концентрации пыли составило 60%.

С целью подтверждения эффективности внедряемых организационно-технологических решений выполнен расчет социально-экономического эффекта от предотвращенного вреда за счет сокращения выбросов пыли от строительного производства. Расчет произведен согласно Методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды. Данные для расчета предоставлены ООО «Р-Строй» по результатам реализованного точечного строительства 14-этажного жилого дома в г. Ростове-на-Дону, где масса выбросов мелкодисперсной пыли в период реализации строительства в соответствии с сетевым графиком учета удельного объема выбросов частиц мелкодисперсной пыли при СМР, PM10 – 1,36 тонны, PM2,5 – 0,68 тонны. Согласно произведенному расчету, стоимость предотвращенного вреда составила – 1411,47 тыс. рублей.

Разработаны паспорта пыли, образующейся от строительных работ, включающий перечень видов пыли с описанием физико-химических свойств. Данные паспорта применяются при разработке проектной документации.

Получены патенты на полезные модели конструкций зеленой кровли для жилых зданий № 163334 (Патент на полезную модель № 163334 U1 Российская Федерация, МПК E04D 11/00. Конструкция зеленой кровли: № 2015153616/03: заявл. 14.12.2015: опубл. 10.07.2016 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, А. В. Войт; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ) и общественно деловых зданий № 191863 (Патент на полезную модель № 191863 U1 Российская Федерация, МПК E04D 11/00. Конструкция зеленой кровли: № 2019119818: заявл. 26.06.2019: опубл. 26.08.2019

/ Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, Е. В. Тимошенко, А. Д. Семерникова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ). Внедрение конструктивных решений в процесс обновления фасада здания вокзала в Иваново позволило снизить выбросы пыли до $0,25 \text{ мг/м}^3$ в напряженный период работ, в то время как при реконструкции аналогичных объектов концентрация пыли составляла $0,45 \text{ мг/м}^3$.

Мероприятия по снижению выбросов пыли внедрены на ООО «ИБТ» (Москва), АО институт «Ростовский Промстройиниипроект» (Ростов-на-Дону), АО «РЖДстрой» (Москва), ООО «Альфа Инжиниринг» (Ростов-на-Дону), ООО «Р-Строй» (Ростов-на-Дону), ИП Акопян В.Ф. (Ростов-на-Дону), ФГБОУ ВО «ДГТУ» (Ростов-на-Дону) и других организациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача совершенствования системы защиты атмосферного воздуха от загрязнения пылью при точечном строительстве в городской среде и разработаны научные основы и методология формирования системы экологической безопасности при точечной застройке на основе критерия минимизации загрязнения атмосферы пылью. По результатам диссертационного исследования можно сделать **основные выводы**:

1. Анализ предыдущих исследований отечественных и зарубежных ученых, направленный на изучение выбросов пыли при строительстве показал, что в большинстве стран мира строительная отрасль является одним из основных источников загрязнения воздуха городских территорий и агломераций. При этом исследования, посвященные точечной застройке, практически отсутствуют.

2. Проведенный анализ технологических процессов при строительстве позволил классифицировать источники и выделить основные. Проведены экспериментальные исследования максимально разовых выбросов пыли от строительных процессов при точечной застройке. Для технологических процессов характерных для точечного строительства проведены на реальных объектах натурные исследования запыленности воздушной среды на строительной площадке в зоне влияния источников пыления (технологические процессы).

3. Натурные замеры дисперсного состава пыли в воздушной среде близлежащих территорий при точечной застройке (до 200 м) показали, что частицы размером более 10 мкм практически отсутствуют, а для 95 % замеров не превышают 10 мкм. Поэтому важно ограничить концентрацию частиц PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ на строительной площадке. Для пыли, выделяющейся при технологических процессах строительства, определён дисперсный состав пыли в воздухе рабочих зон стройплощадки в том числе исследовано изменение дисперсного состава пыли по высоте. На основании дисперсного состава и прямых измерений получены значения частиц $\text{PM}_{0,5}$ - PM_{10} .

4. На основании анализа существующей модели построения интегральных функций распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам показано, что для оценки дисперсного состава $\text{PM}_{2,5}$ - PM_{10} на строительной площадке и в воздухе близлежащей территории лучше всего подходят трехзвенные модели

(прямая + парабола + гипербола). Проверка проводилась на основании критерий согласия Пирсона и Колмогорова.

5. Проведенные экспериментальные и натурные исследования позволили получить результаты дисперсного состава пыли для каждого технологического строительного процесса с целью построения дифференциальных функций распределения значений функций прохода при фиксированных диаметрах частиц d_i и рассматривать интегральные функции распределения как случайный процесс. Аналогично как случайный процесс можно рассматривать интегральную концентрацию.

6. Исследование концентрации пыли общей, PM10, PM2,5 при применении разработанных автором технических решений: пылезащитный экран, пушка пылеулавливания, конструкций зеленой кровли показали их достаточно высокую эффективность. Кроме того, было показано, что для оценки мероприятий по защите воздушной среды близлежащих территорий следует учитывать взаимосвязь концентраций частиц PM10 и PM2,5 в воздухе стройплощадки и близлежащей территории.

7. Разработана ансамблевая модель прогнозирования качества атмосферного воздуха в зависимости от параметров воздушной среды на строительной площадке с использованием алгоритмов машинного обучения XGBoost, Random Forest (RF) и ARIMA.

8. Усовершенствован сетевой график производства работ с учетом дополнительной информации о прогнозировании запыленности в зоне производства технологических строительных операций при точечной застройке, на основании которого сформирован ГИС слой в программе ArcGIS Online для оценки запыленности на стройплощадке.

9. Предложена система индикаторов для экологического риск-анализа влияния частиц PM2,5 и PM10, поступающих в воздушную среду городской территории при ведении точечной застройки.

10. На основании проведенных исследований предложены методы учета выбросов пыли, поступающей в атмосферу при ведении точечной застройки, при сводных расчетах.

11. Полученные автором результаты апробированы в производственных условиях. Результаты диссертационного исследования внедрены в АО «РЖДстрой» г. Москва, АО институт «Ростовский Промстройинипроект» г. Ростов-на-Дону, ООО «ИБТ» г. Москва, ООО «Альфа Инжиниринг», г. Ростов-на-Дону, ООО «Р-Строй» г. Ростов-на-Дону, ИП Акопян В.Ф. г. Ростов-на-Дону. Разработанные новые научно-обоснованные технические решения по сокращению выбросов пыли на строительной площадке относятся к современным отечественным разработкам по защите атмосферного воздуха от загрязнения пылью, что дает возможность беспрепятственного процесса их внедрения в практическую деятельность предприятий и организаций.

12. Социально-экономический предотвращенный эффект от предотвращения экологического вреда за счет сокращения выбросов пыли от строительства – 1 411 475 рублей.

Разработанные в диссертации научные предложения решают научную проблему в несоответствии состояния экологической безопасности и уровня

загрязнения атмосферного воздуха городских территорий при точечной застройке и нормативной моделью расчёта, принятой в научной и проектной практике, не отражающей комплексного характера обеспечения экологического благополучия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

*Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных
научометрических базах данных Scopus и Web of Science*

1. The pollution prevention during the civil construction / Valery Azarov, Svetlana Manzhilevskaya, Lubov Petrenko // MATEC Web of Conferences, TFOCE, Rostov-on-Don, 17-21 сентября 2018 года. – Rostov-on-Don, 2018. – P. 04073. – doi 10.1051/mateconf/201819604073.

2. Environmental Monitoring of Ecological Safety During Construction Works / V. Azarov, S. Manzhilevskaya, L. Petrenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, CATPID-2019, Kislovodsk, 1-5 октября 2019 года. – Kislovodsk, 2019. – P. 055003. – doi 10.1088/1757-899X/698/5/055003.

3. Organizational and economic problems of ecological safety in construction / V. Azarov, S. Manzhilevskaya, L. Petrenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, CATPID-2019, Kislovodsk, 1-5 октября 2019 года. – Kislovodsk, 2019. – P. 055007. – doi 10.1088/1757-899X/698/5/055007.

4. The Study of Local Dust Pollution of Atmospheric Air on Construction Sites in Urban Areas / V. Azarov, L. Petrenko, S. Manzhilevskaya // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 983. – P. 430-439. – doi 10.1007/978-3-030-19868-8_43.

5. Fine dust atmospheric pollution from the objects of infill construction / Svetlana Manzhilevskaya, Alexei Lihonosov, Lubov Petrenko // E3S Web of Conferences, ITESE-2019, Divnomorskoye, 9-14 сентября 2019 года. – Divnomorskoye, 2019. – P. 01020. – doi 10.1051/e3sconf/201913501020.

6. Social and economic aspects of environmental protection measures for environmental safety / Svetlana Manzhilevskaya, Lubov Petrenko // Advances in Economics, Business and Management Research. – 2019. – Vol. 90. – P. 139-142. – doi 10.2991/ispcbc-19.2019.34.

7. Improving design solutions for the organization of construction production and the construction site equipment taking into account environmental safety during the reconstruction of facilities / S. Manzhilevskaya, L. Petrenko, V. Azarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, CATPID-2020, Kazan, 26-30 сентября 2021 года. – Kazan, 2020. – P. 042013. – doi 10.1088/1757-899X/913/4/042013.

8. Monitoring Methods for Fine Dust Pollution During Construction Operations / S. Manzhilevskaya, L. Petrenko, V. Azarov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1259. – P. 332–340. – doi 10.1007/978-3-030-57453-6_29.

9. Vertical Distribution of Fine Dust During Construction Operations / Svetlana Manzhilevskaya, Lubov Petrenko, Valery Azarov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1259. – P. 324-331. – doi 10.1007/978-3-030-57453-6_28.

10. Green Roof as Ecological Security Design Solution During Reconstruction of Buildings / Svetlana Manzhilevskaya, Lubov Petrenko, Sofia Kravchenko [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 247. – P. 235-245. – doi 10.1007/978-3-030-80946-1_24.

11. Dynamics of Fine Dust Particles During Construction Works / Svetlana Manzhilevskaya, Victoria Turyanskaya, Denis Averin [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 706. – P. 390-399. – doi 10.1007/978-3-031-36960-5_45.

12. Environmental Risks at a Construction Site During Infill Development in the City / S. E. Manzhilevskaya // *Ecology and Industry of Russia*. – 2024. – Vol. 28(6). – P. 35-41. – doi 10.18412/1816-0395-2024-6-35-41.

13. Dust Pollution in Construction Sites in Point-Pattern Housing Development / S. Manzhilevskaya // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14(9). – P. 2991. – doi 10.3390/buildings14092991.

14. Environmental Assessment of Dust Pollution in Point-Pattern Housing Development / S. Manzhilevskaya // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – P. 1466. – doi 10.3390/buildings15091466.

Работы, опубликованные в журналах и изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

по специальности 2.10.2 Экологическая безопасность (технические науки)

1. Учет загрязнения воздуха от точечного строительства в сводных расчетах загрязнения атмосферного воздуха / М. В. Оводков, С. Е. Манжилевская, А. О. Бурлаченко, В. Н. Азаров // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2024. – №3(96). – С. 166-175.

2. К оценке концентрации мелкодисперсных частиц в пылевых загрязнениях воздушной среды, образующихся при проведении ремонтно-строительных работ / Д. П. Боровков, А. Б. Стрелева, С. Е. Манжилевская, Е. А. Калюжина // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2024. – № 3(96). – С. 125-131.

3. Применение пылезащитных экранов в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий / С.Е. Манжилевская, В.Н. Азаров // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2025. – № 2(70). – С. 232-237.

4. Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий / С.Е. Манжилевская, А.И. Евтушенко, Д.Р. Маилян // *Безопасность техногенных и природных систем*. – 2025. №2(9). – С. 136-145.

5. О предотвращении распространения мелкодисперсной пыли на стройплощадке при кладке стен из газобетонных блоков с точки зрения экологической безопасности / С. Е. Манжилевская, А. О. Бурлаченко, Н. С. Бакин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – № 2(99). – С. 194-201.

6. О разработке графика учета удельного объема пылевых выбросов частиц PM_{2.5} и PM₁₀ в строительстве / С. Е. Манжилевская, Д. Р. Маилян, В.И. Чурикова, А. О. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – № 2(99). – С. 202-210.

7. Экологические риски при точечной застройке: анализ загрязнения атмосферы городской территории PM_{2.5} и PM₁₀ / С.Е. Манжилевская, Н.В. Бакин, В.Н. Азаров // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2025. №2(74) – С. 163-176.

8. Оценка негативного воздействия мелкодисперсной пыли на городскую территорию от точечной застройки / С.Е. Манжилевская // Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – №2(55) – С. 116-125.

9. Применение алгоритмов машинного обучения при прогнозировании загрязнения PM_{2.5} в строительстве / С.Е. Манжилевская, Д.Р. Маилян // Строитель Донбасса. – 2025. – №2(31) – С. 85-93.

10. Методология выбора пылеулавливающего оборудования для защиты атмосферного воздуха от точечной застройки / С.Е. Манжилевская, Д.Р. Маилян // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2025. – №3 (173) – С. 109-117.

11. Снижение негативного воздействия на окружающую среду объектов точечной застройки при благоустройстве территории с применением тротуарной плитки из переработанного полимера / А. А. Овсепян, С. Е. Манжилевская, Д. Р. Маилян, Н. С. Бакин // Строитель Донбасса. – 2025. – № 2(31). – С. 94-100.

по специальности 2.1.10 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

12. Строительная площадка, как источник загрязнения воздушной среды городских территорий / С.Е. Манжилевская, Е.О. Еманов, И Цзиньлэй // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2 (110). – С. 383-392.

13. Планирование и реализация строительных работ при точечной застройке для определения удельных пылевых выбросов / С. Е. Манжилевская // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. – № 32(84). – С. 75-84.

14. Влияние мелкодисперсной пыли на окружающую среду при локальном строительстве / С. Е. Манжилевская // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 6(92). – С. 86-98.

15. Разработка и применение в проектировании модели локализации строительного производства с целью повышения экологической безопасности / С.

Е. Манжилевская, А. В. Морозов // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 1.

16. Экологический мониторинг экологической безопасности в зонах строительства, реконструкции и функционирования объектов / С. Е. Манжилевская // Строительные материалы и изделия. – 2019. – № 3(2). – С. 78-84.

17. Организационно-экономические проблемы экологической безопасности в строительстве / С. Е. Манжилевская // Строительные материалы и изделия. – 2019. – № 4(2). – С. 73-78.

18. Исследование распространения частиц мелкодисперсной пыли в рабочей зоне строительных процессов / С. Е. Манжилевская // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9(60). – С. 63.

Монографии, опубликованные по теме диссертации

1. Исследование процессов пылезагрязнения воздушной среды при локальной застройке территорий: Монография / С. Е. Манжилевская, В. Н. Азаров; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2020. – 160 с.

Патенты по теме диссертации

1. Патент на полезную модель № 197551 U1 Российская Федерация, МПК E21F 5/02. Пушка пылеподавления: № 2020101635: заявл. 17.01.2020: опубл. 13.05.2020 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, А. И. Кирюхин, А. В. Колесников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ).

2. Патент на полезную модель № 191863 U1 Российская Федерация, МПК E04D 11/00. Конструкция зеленой кровли: № 2019119818: заявл. 26.06.2019: опубл. 26.08.2019 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, Е. В. Тимошенко, А. Д. Семерникова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ).

3. Патент на полезную модель № 192629 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/92, E04G 5/00. Пылезащитный экран: № 2019121222: заявл. 08.07.2019: опубл. 24.09.2019 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, Н. В. Коваль, А. А. Тутаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ).

4. Патент на полезную модель № 163334 U1 Российская Федерация, МПК E04D 11/00. Конструкция зеленой кровли: № 2015153616/03: заявл. 14.12.2015: опубл. 10.07.2016 / Л. К. Петренко, С. Е. Манжилевская, А. В. Войт; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ).

МАНЖИЛЕВСКАЯ СВЕТЛАНА ЕВГЕНЬЕВНА

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
ТОЧЕЧНОЙ ЗАСТРОЙКЕ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ
МИНИМИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПЫЛЬЮ**

**2.10.2 Экологическая безопасность
(технические науки)**

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

В печать 29.12.2025. Формат 60x84/16.
Объем 2,5 усл. п. л. Тираж 120 экз. Заказ № 1344

Отпечатано в типографии издательского центра ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1