

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Курносов Илья Юрьевич

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ ПРОДУКТОВ ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ОРОШЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Специальность  
2.10.3 «Безопасность труда»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
д.т.н, доцент Филин А.Э.

Москва – 2026

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Важной и нерешенной научно-практической задачей горно-металлургической промышленности на сегодняшний день является разработка эффективных методов по осаждению, подавлению и локализации взвешенной мелкодисперсной, а особенно тонкодисперсной, пыли. Большинство горно-металлургических предприятий в своих технологических процессах используют различные способы по снижению количества выбросов. Из всего многообразия отходов горно-металлургического производства пыль относится к одним из наиболее опасных видов веществ, образующихся в процессе производства.

Согласно статистике, максимальная концентрация пыли на горно-металлургических предприятиях может превышать допустимые значения в 100 и более раз. Горно-металлургическая отрасль характеризуется высоким уровнем воздействия вредных факторов: в металлургическом производстве 69% работников трудятся в опасных условиях труда, в том числе 21,9% — подвержены воздействиям аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), что связано с риском заболеваний дыхательной системы. В добыче металлических руд эти показатели составляют 71,1% (вредные факторы) и 26,1% (АПФД) соответственно. Доля работников, подвергающихся фактору, связанному с АПФД, относительно остальных опасных фактов на горно-металлургических предприятиях, составляет 12,6 % и является 4-м по значимости.

Исходя из статистики заболеваемости, наибольший вклад в профессиональные заболевания вносят добывающие и обрабатывающие производства. Несмотря на то, что с 2019 г. наблюдалась тенденция к снижению профессиональной заболеваемости на горно-металлургических предприятиях, с 2020 по 2024 наблюдается обратная картина – рост заболеваемости, связанной с воздействием промышленных аэрозолей с 10,91% (2020 г.) до 14,61% (2024 г.).

Существуют различные методы пылеподавления и осаждения, применяются различные агрегаты и смеси для снижения концентрации пыли на территории технологических объектов. К таким методам относятся жидкостное орошение, использование рукавных фильтров и циклонов, абсорберов и скрубберов. К одним из перспективных способов эффективного снижения концентрации пыли в рабочей зоне относится метод пульсирующей вентиляции. Данный метод применяется в основном на территориях горнодобывающих предприятий.

Однако, использование существующих методов пылеподавления нередко подразумевает большое количество финансовых вложений – как при покупке и установке оборудования, так и при его обслуживании. Использование большого количества

пылеосаждающей жидкости, замена и очистка фильтров, обновление оборудования и т.д. требует от предприятия выделения средств с определенной периодичностью. Предприятия не всегда признают практическую реализацию таких методов эффективной. Одним из путей решения данного вопроса является комбинирование существующих методов очистки от пыли, а именно совместное применение орошения и метода пульсирующей вентиляции.

Применение такого комбинированного метода при использовании рациональных параметров на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата позволит повысить эффективность пылеосаждения орошением и снизить пылевую нагрузку на технологическое оборудование. Таким образом, применение комбинированного метода повышает уровень безопасности по пылевому фактору и надежность технологического оборудования, снижая его аварийность. В связи с вышеизложенным, совершенствование метода пылеосаждения орошением, исследованиями которого занимается большое количество специалистов, является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы исследований** установлена в результате анализа обширной тематической информации, опубликованной в различных источниках. Исследованиями аэрозолей занимались А.С. Бурчаков, Н.А. Фукс и др. Разработка вентиляции и механизмы пылеосаждения описывались в работах выдающегося ученого – академика А.А. Скочинского. Также ощутимый вклад в науку пылеосаждения и вентиляции внесли работы А.Т. Айруни, Н.О. Калединой, Ф.С. Клебанова, А.И. Ксенофоновой, О.В. Скопинцевой, К.З. Ушакова, А.Э. Филина и др. Изучение воздействия пульсирующей вентиляции (воздействие импульсами давления воздуха) на массоперенос метана в шахтах горнодобывающих предприятий проводилось К.З. Ушаковым, А.Э. Филиным, В.В. Косаревым, С.С. Кобылкиным, А.С. Кобылкиным, но для снижения концентрации пыли комбинированным методом (орошение с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции) исследования не проводились.

**Цель работы** - обоснование оптимальных параметров осаждения пыли железной агломерационной руды на участке разгрузки продуктов подготовки железорудного концентрата (ППЖК) при орошении с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методов пылеосаждения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата горно-металлургического комплекса.
2. Проведение физического моделирования процесса пылеосаждения орошением с использованием метода пульсирующей вентиляции.

3. Разработка математической модели массопереноса в условиях пылеосаждения орошением и пульсирующей вентиляции.

4. Обоснование рациональных параметров орошения и пульсирующей вентиляции для повышения эффективности коагуляции частиц аэрозоля, ускорения осаждения коагулированных частиц пыли и повышения уровня безопасности по пылевому фактору.

**Идея работы** заключается в повышении эффективности пылеосаждения с помощью орошения и применением дополнительно к нему пульсирующей вентиляции.

**Научная новизна исследования:**

Разработанная математическая модель массопереноса позволила обосновать рациональные параметры орошения и пульсирующей вентиляции (диаметр форсунки, частота импульсов и расход воздуха пульсирующего устройства), применение которых, ускоряет осаждение пыли и способствует повышению уровня безопасности по пылевому фактору.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Применение орошения с пульсирующей вентиляцией позволяет снизить время осаждения пыли железной агломерационной руды на участке разгрузки продуктов подготовки концентрата для исследуемых условий в 1,4 раза.

2. Разработанная математическая модель, описывающая комбинированный метод осаждения пыли руды железной агломерационной с учетом предложенного коэффициента осаждения, позволяет определить время осаждения.

3. Определенные для объекта исследования рациональные параметры орошения и метода пульсирующей вентиляции позволяют повысить уровень безопасности по пылевому фактору участка подготовки продуктов железорудного концентрата горно-металлургических предприятий.

**Предметом** исследования является повышенная запыленность участка разгрузки ППЖК пылью железной агломерационной руды горно-металлургического предприятия, формирующая высокие показатели аварийности по пылевому фактору.

**Объектом** исследования является процесс массопереноса в условиях повышенной запыленности участка ППЖК агломерационного производства горно-металлургического предприятия.

**Теоретическая значимость** заключается в полученной математической модели осаждения пыли железной агломерационной руды участка ППЖК комбинированным методом.

**Практическая значимость** заключается в разработанном комбинированном методе пылеосаждения и научно обоснованных параметрах эффективного применения в условия разгрузки продуктов подготовки железорудного концентрата. Применение данного метода, с

учетом рациональных параметров, позволит повысить уровень безопасности по пылевому фактору, снизить аварийность и минимизировать безвозвратные потери используемого сырья.

### **Методы исследования**

В настоящем исследовании использовались современные физические и физико-химические методы исследования аэрозолей. Регистрация концентраций аэрозолей (методика измерения концентрации пыли измерителем массовой концентрации аэрозольных частиц «АЭРОКОН-П»), анализ содержания химических элементов (рентгенофазовый анализ (РФА), рентгенофлуоресцентный анализ), анализ размера частиц в пробе (гранулометрический анализ). В работе использовались такие методы, как системный анализ, математическое моделирование, лабораторные эксперименты, статистический метод обработки результата, метод анализа и синтеза.

### **Соответствие паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует следующему пункту паспорта специальности:

*Пункт 6.* Разработка научных основ, установление области рационального применения и оптимизация способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов.

*Пункт 10.* Совершенствование методов обеспечения безопасности при техническом обслуживании, предремонтной подготовке, ремонте и эксплуатации технических средств, оборудования и сооружений объектов. Повышение надежности оборудования объектов защиты.

**Достоверность результатов** работы обеспечена воспроизводимостью методик измерения концентраций аэрозолей, набором используемых современных физических и физико-химических методов исследования образцов и применением современных научно-обоснованных подходов и теорий для анализа результатов (регрессионный анализ, машинное обучение). Достоверность измерений массовой концентрации аэрозоля определяется разрешающей способностью и актуальными методами поверки приборов, качеством информации об источниках погрешностей измерений, а также использованием большого количества полученных в результате исследований (240 экспериментов и более 280 000 измерений) и методов статистической обработки полученных результатов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования были представлены на российских и международных форумах и конференциях:

1. XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов (апрель 2020).
2. XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 г.).

3. Научные семинары кафедры «Техносферная безопасность» НИТУ МИСИС (2022-2023).

4. VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности (РХТУ им. Д.И. Менделеева) (апрель 2024).

5. Семинар НИТУ МИСИС «Склады твёрдых полезных ископаемых. Технологии, транспорт и экология» (октябрь 2024).

**Публикации.** Результаты работы отражены в 10 печатных статьях (в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 8 в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus).

**Личный вклад автора** заключается в подготовке и анализе литературного обзора; разработке методик и проведении экспериментов по осаждению пыли ППЖК, пылеосаждению орошением и осаждению пыли ППЖК комбинированным методом; статистической обработке экспериментальных данных; разработке, сборке и тестировании лабораторной установки по осаждению мелкодисперсных аэрозолей; консолидации и структурированию полученных результатов; разработке расчетного аппарата; разработке математической модели пылеосаждения; подготовке публикаций о результатах исследований.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 74 рисунка, 18 таблиц, список использованных источников из 155 наименований и 3 приложения.

Автор диссертации искренне благодарит своих учителей: доктора технических наук, профессора А.Э. Филина и кандидата технических наук, доцента С.В. Тертычную. Автор искренне благодарит сотрудников кафедры «Техносферная безопасность» за консультации при написании диссертации. Также автор благодарит коллег кафедры «Радиохимии» Химического факультета МГУ. Отдельную благодарность автор выражает кандидату географических наук Н.В. Кузьменковой, кандидату химических наук И.Э. Власовой, кандидату химических наук А.А. Смирновой и кандидату геолого-минералогических наук А.С. Торопову. Особая благодарность доктору технических наук В.Н. Михайловой.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обозначена актуальность темы диссертационной работы, определены цели и основные задачи исследования, сформулированы объект, предмет исследования, теоретическая и практическая значимость работы, а также научная новизна. Также в работе обозначена достоверность проведенных исследований, представлена апробация работы и публикации по теме исследования.

**Первая глава** диссертации посвящена комплексному анализу состояния пылевой обстановки на горно-металлургических предприятиях Российской Федерации, показана высокая степень загрязнения воздушной среды аэрозолями преимущественно фиброгенного действия (АПФД) и установлена необходимость совершенствования систем пылеулавливания. Отмечено, что действующие технологии — жидкостное орошение, циклонная очистка, пылеотстойные камеры, фильтрационные и скрубберные установки — обеспечивают снижение концентрации пыли, но могут быть усовершенствованы с целью снижения затрат жидкости на орошение и потерь уловленного, осажденного продукта при его перемещении.

При концентрациях пыли в рабочих зонах до 0,5–1 г/м<sup>3</sup> превышения предельно допустимых значений могут достигать 100-кратного уровня, что в 2–3 раза выше, чем на предприятиях химической и энергетической отраслей. Согласно данным Минтруда и Роспотребнадзора, до 69% работников металлургического производства и 71,1% работников добычи руд подвергаются воздействию вредных факторов, из которых 21,9% и 26,1% соответственно сталкиваются с АПФД, что коррелирует с ростом профессиональной заболеваемости пневмокониозами и бронхитами.

Проведен анализ динамики профессиональных заболеваний за период 2016–2024 гг., показавший, что доля заболеваний, вызванных физическими факторами, колеблется от 42 до 51%, а связанных с промышленными аэрозолями — от 10,9 до 15,9%, при этом с 2021 года наблюдается устойчивая тенденция роста. Доля проб воздуха с превышением ПДК по пыли и аэрозолям в 2023 году увеличилась на 12% относительно 2021 года, что свидетельствует о снижении эффективности пылеулавливающих систем.

При проведении исследований аварийности транспортных узлов на этапах транспортировки железорудного концентрата (рис.1) установлено, что около 34,4% аварий вызваны износом элементов, связанным с пылевыми отложениями и загрязнением приводных и очистных устройств. Анализ данных MSHA (Mine Safety and Health Administration) подтверждает, что пылеобразование при разгрузке концентрата является одним из ключевых факторов, приводящих к отказам конвейерного оборудования.

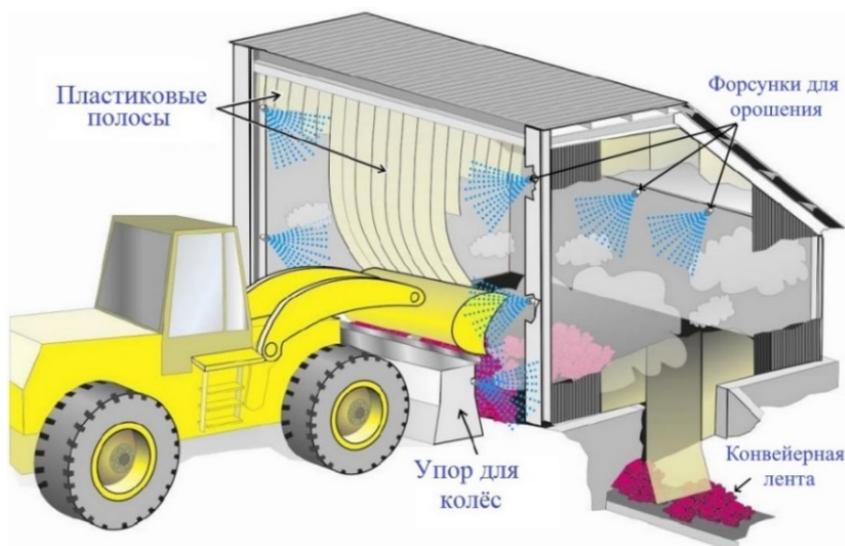


Рисунок 1 – Схема применения ограждающих конструкций (пластиковые полосы) и метода жидкостного орошения в месте разгрузки продуктов подготовки железорудного концентрата.

Теоретически обоснован механизм интенсификации коагуляции

аэрозоля под воздействием импульсов давления ( $\Delta p$ ), генерируемых пульсатором. В данном процессе наблюдается повышение интенсивности турбулентности и рост коэффициента турбулентной диффузии, что способствует усилению массопереноса и увеличению вероятности столкновений частиц. Импульсы давления, обусловленные разностью скоростей ( $\Delta v$ ), в отличие от стационарного потока воздуха, вызывают ускоренное движение частиц пыли и жидкости, формируя вихревые структуры и вращение комплекса частиц вокруг их центра масс. Возникающее вращение воздушных масс повышает частоту коагуляционных столкновений, обеспечивает распределение жидкой фазы по поверхности частиц и способствует устойчивости формирующейся системы «пыль – вода». Применения метода пульсирующей вентиляции для повышения эффективности коагуляции частичек пыли с мелкодисперсным аэрозолем способно снизить время осаждения пыли на данном участке и увеличить эффективность пылеосаждения орошением, тем самым повышая надежность оборудования и снижая безвозвратные потери материала.

**Во второй главе** представлено экспериментальное исследование процессов осаждения пыли различными методами: гравитационным способом, при жидкостном орошении и при использовании пульсирующей вентиляции. Для воспроизведения реальных условий пылеобразования в лабораторных масштабах разработана экспериментальная установка объемом  $1 \text{ м}^3$ , выполненная из прозрачного оргстекла и армированная алюминиевым профилем (рис. 2), а также методика проведения экспериментов. В качестве основного средства измерения применялся прибор АЭРОКОН-П (позиция 2 на рис. 2), обеспечивающий регистрацию массовой концентрации аэрозольных частиц размером  $\geq 10 \text{ мкм}$  с разрешающей способностью  $0,01 \text{ мг/м}^3$ .

Схема эксперимента предусматривала измерения в девяти контрольных точках, равномерно распределенных по площади дна лабораторного бокса, что обеспечивало пространственную достоверность полученных данных. Контроль микроклиматических параметров — температуры (22–25 °С), влажности (25–30 %) и скорости воздушного потока (4 м/с) — осуществлялся с помощью метеометра TESTO 435 (позиция 4 на рис. 2) и цифрового анемометра (при первоначальной настройке генератора), что позволило поддерживать стабильность экспериментальных условий.

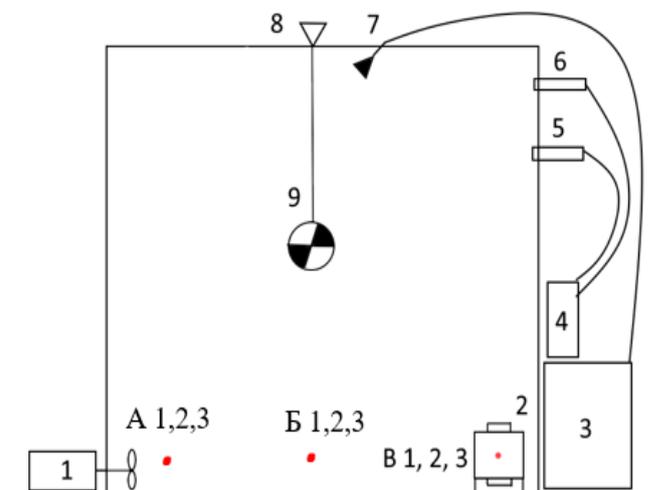
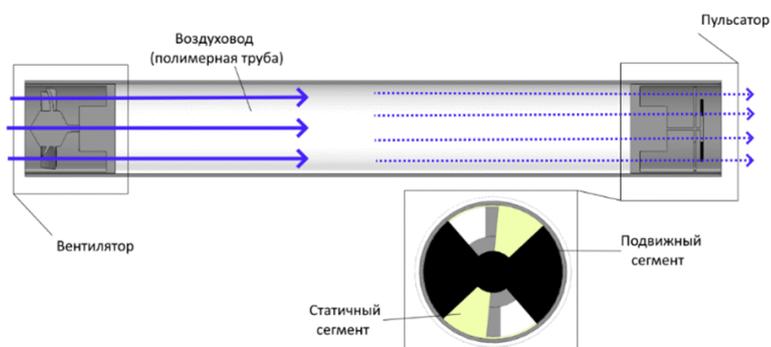


Рисунок 2 – Схема лабораторной установки по осаждению пыли

(1 – генератор воздушного потока; 2 – Аэрокон-П; 3 – генератор тумана; 4 – метеометр; 5 – датчик влажности; 6 – датчик температуры; 7 – форсунка; 8 – засыпная воронка; 9 – воздушный пульсатор).

Для моделирования системы орошения использовалась установка туманообразования с форсунками E218 диаметрами 10, 15 и 20 мкм при рабочем давлении от 5,4 МПа до 12,4 МПа, что соответствует диапазону, применяемому в промышленных пылеподавляющих системах. Воздушный пульсатор, выполненный в виде полимерной трубы диаметром 100 мм и длиной 570 мм, обеспечивал пульсации потока с частотой вращения подвижного сегмента 16–600 об/мин, создавая периодические импульсы давления, характерные для метода пульсирующей вентиляции. Площади сечения трубы ( $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ) и отверстия статичного сегмента, являющимися воздушными проемами пульсатора ( $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ), позволяли формировать устойчивые турбулентные воздушные потоки (скорость воздуха не превышает 5 м/с), необходимые для анализа динамики коагуляции частиц (рис. 3).

Рисунок 3 – Схема работы воздушного пульсатора, используемого в эксперименте.



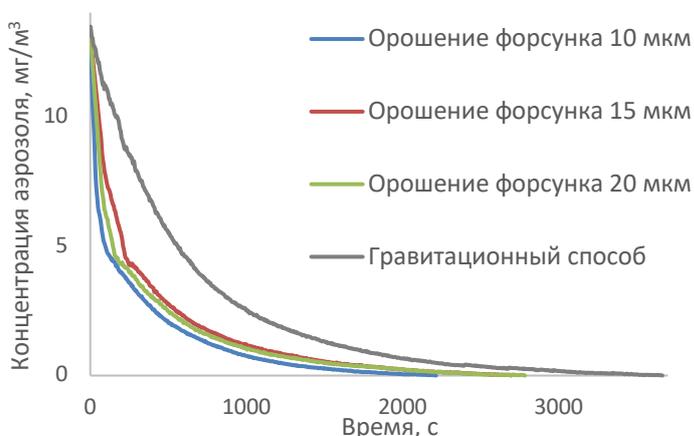
Точки на схеме (рис. 2), обозначенные буквами А, Б, В, соответствуют направлению перемещения датчика Аэрокон-П (позиция 2 на рис. 2). Цифры 1, 2 и 3 (находящиеся рядом с буквами) соответствуют месту проведения эксперимента.

Согласно описанной выше схеме, эксперимент проводился по всей площади дна лабораторного бокса, а именно в 9-и его точках (8 точек расположены равноудаленно (250 мм) от стенок по периферии лабораторной установки и одна в центре).

Эксперименты проводились при постоянной скорости подачи воздуха 4 м/с, навеска пыли вводилась через засыпную воронку в течение 3–5 с. Прибор АЭРОКОН-П фиксировал изменение концентрации каждые 5 с, позволяя построить кривые осаждения для каждого режима. Завершение эксперимента фиксировалось при достижении концентрации 0,00 мг/м<sup>3</sup>, что соответствовало полному осаждению пылевых частиц. Полученные данные позволили количественно оценить влияние импульсного режима вентиляции и жидкостного орошения на кинетику пылеосаждения и сформировать экспериментальную основу для дальнейшего исследования.

В качестве исследуемого материала использовалась пыль железорудного концентрата с дисперсностью от 1–40 мкм (частицы до 10 мкм – 18%) согласно гранулометрическому анализу. Для повышения точности измерений масса навески увеличивалась до 5 г, что обеспечивало достаточную концентрацию мелкодисперсных частиц в рабочем объеме. Элементный анализ (рентгенофлуоресцентный анализ) показал, что пыль содержит 68,98 % - Fe, что подтверждает ее принадлежность к концентратам железистого типа.

При данных условиях для достоверности экспериментальных данных было проведено 10 экспериментов (выбор количества экспериментов был основан на принципе необходимости и достаточности) по осаждению. Зависимости средних значений концентрации пыли от времени осаждения приведены на рисунке 5. Установлено, что без использования орошения и пульсирующей вентиляции среднее значение времени осаждения пыли (рис. 5) составляет 3665 с ( $\approx$ 61 мин).



*Рисунок 5 – Сводный график изменения среднего значения концентрации аэрозоля от времени при самоосаждении пыли и осаждении пыли орошением.*

В течение этого времени пыль находится в воздухе рабочей зоны и наносит вред не только оборудованию, но и персоналу предприятия. Полученное значение времени осаждения потребуется для определения

эффективности пылеосаждения орошением, а также при комбинированном использовании орошения и метода пульсирующей вентиляции.

В соответствии с зависимостями концентрации пыли от времени, полученными выше, были проведены эксперименты по пылеосаждению орошением для определения эффективности используемого метода относительно условий микроклимата, установленного в лабораторном стенде. Контроль параметров микроклимата во время эксперимента позволяет корректировать параметры эксперимента при необходимости и уменьшать влияние случайных факторов на получаемые результаты. В итоге это способствует получению более точных данных концентрации пылеводяного аэрозоля и времени его осаждения.

Используя идентичные значения температуры, влажности и скорости движения воздуха при проведении эксперимента по пылеосаждению, исследования осаждения пылеводяного аэрозоля проводились при поочередном использовании 3-х форсунок (10, 15 и 20 мкм) и контроле подаваемого давления (5,4 МПа) жидкости. Использование данного набора форсунок обосновано технологией «сухого тумана». При уменьшении диаметра форсунок ниже 10 мкм распылённая жидкость интенсивно испаряется и увлажняет воздух, снижая эффективность орошения, тогда как превышение диаметра свыше 20 мкм приводит к формированию крупных капель, выходящих за пределы технологии «сухого тумана».

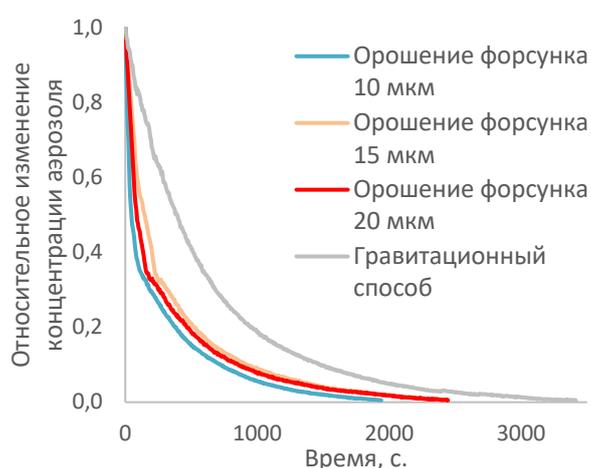
Для повышения достоверности полученных данных по осаждению пылеводяного аэрозоля с использованием 3-х форсунок было проведено 10 экспериментов. Установлено, что среднее значение времени осаждения аэрозоля при использовании форсунки на 10 мкм составляет 2215 с ( $\approx 36$  мин). Эффективность данного способа (понимаемая, как сокращение времени гравитационного осаждения пыли) составляет порядка 40%. При использовании форсунки на 15 и 20 мкм, среднее время осаждения аэрозоля составило 2695 с ( $\approx 45$  мин.) и 2785 с. ( $\approx 46$  мин.) соответственно. Эффективность орошения с форсункой на 15 и 20 мкм - 26,4 % и 24% соответственно.

Поскольку динамика осаждения при орошении с применением форсунок на 10, 15 и 20 мкм различалась, для сопоставления темпов этого процесса на разных стадиях при различных диаметрах форсунок использовали относительную концентрацию пыли, вычисляемую в соответствии с формулой (1). Пересчитанные зависимости представлены на рисунке 6. Все последующие результаты экспериментов также подверглись описанной выше обработке и представлены в относительных величинах.

$$C = C_n / C_1 \quad (1)$$

где  $C_n$  – концентрация аэрозоля в момент времени  $n$ ,  $мг/м^3$ ;  $C_1$  – концентрация аэрозоля в начале эксперимента,  $мг/м^3$ .

Рисунок 6 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени при орошении с использованием форсунок на 10, 15 и 20 мкм.



Эффективность орошения с форсункой на 10 мкм составляет 43,2% (время осаждения 1940 с), с форсункой на 15 мкм 28,5% (время осаждения 2440 с) и с форсункой на 20 мкм 28,4% (время осаждения 2445с). Эксперимент по пылеосаждению также подвергся обработке. Время осаждения составило 3415 с. Мелкодисперсные капли, формируемые форсунками с диаметром 10 мкм, демонстрируют более высокую эффективность увлажнения воздуха по сравнению с каплями большего размера, генерируемыми форсунками с диаметрами 15 и 20 мкм.

При проведении эксперимента по осаждению пыли с применением метода пульсирующей вентиляции (комбинированный метод) также учитывались параметры микроклимата, использующиеся в предшествующих экспериментах, и параметры пульсатора, описанного выше. Согласно проведенным экспериментам по осаждению аэрозоля комбинированным методом, удалось установить параметры пульсатора, позволяющие получить увеличение эффективности метода пылеосаждения орошением:

- скорость движения воздуха в воздуховоде пульсатора – не более 5 м/с;
- расход воздуха в воздуховоде пульсатора – 104 м<sup>3</sup>/ч;
- частота вращения лопастей подвижного сегмента пульсатора – 13 Гц;
- площадь воздушных проемов пульсатора – 3·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>.

Согласно описанным выше параметрам, были получены значения концентрации аэрозолей при использовании трех форсунок. Результаты проведенного эксперимента представлены на рисунке 7.

На рисунке 7 приведены результаты эксперимента в относительных величинах. Установлено среднее время осаждения пыли ППЖК комбинированным методом с применением форсунки на 10, 15 и 20 мкм – 925 с., 1250 с. и 2100 с. соответственно. Эффективность осаждения комбинированным методом относительно самоосаждения пыли составили – 73%, 63,4% и 38,5% соответственно. Снижение эффективности комбинированного метода при использовании форсунки на 15 и 20 мкм, по сравнению с применением форсунки на 10 мкм, составляет 26% и 56% соответственно.

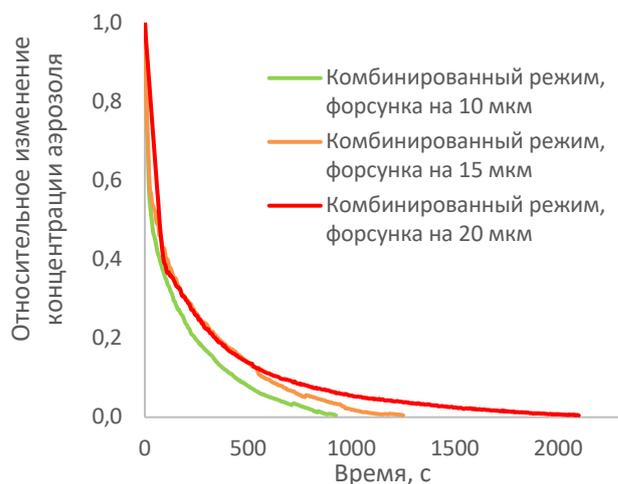


Рисунок 7 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени при орошении с использованием форсунок на 10 и 15 мкм.

Графики зависимости изменения концентрации пыли от проведенных ранее экспериментов были усреднены и наложены друг на друга. Сводный график

относительного изменения концентрации аэрозоля (пересчет по выражению 1) от времени в условиях пылеосаждения, применения орошения (форсунка 10 мкм) и режимом пульсирующей вентиляции приведен на рисунке 8. Установлено среднее время самоосаждения пыли, составляющее 3415 секунд, осаждения с использованием орошения – 1940 секунд, а с применением метода пульсирующей вентиляции в комбинации с орошением

— 925 секунд.

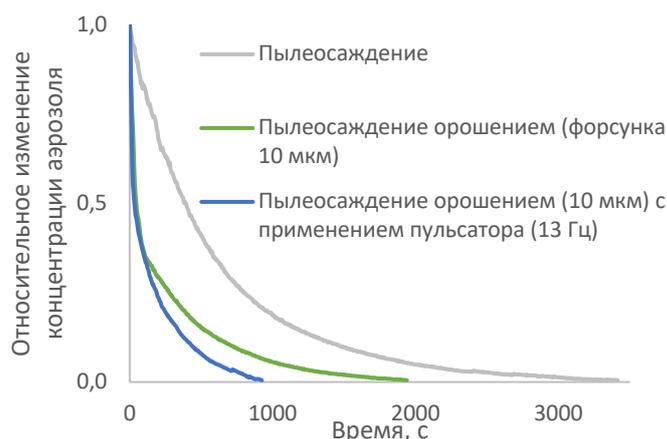


Рисунок 8 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени при различных методах пылеосаждения.

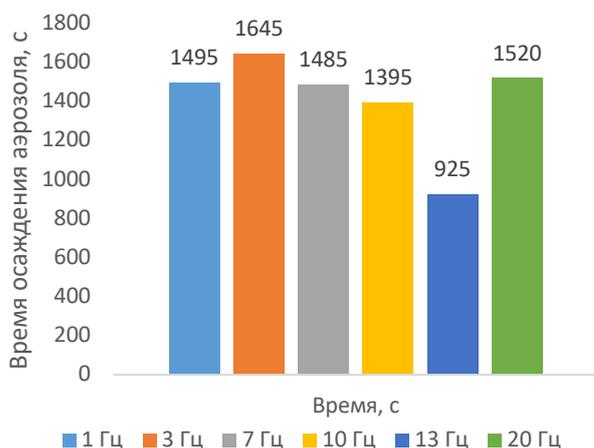
Скорректированные показатели эффективности различных методов

пылеосаждения относительно самоосаждения составляют: для орошения — 43,2%, для орошения с применением метода пульсирующей вентиляцией — ≈73%. При этом орошение с применением метода пульсирующей вентиляции (при уточнении) оказывается на 50,7% эффективнее, чем традиционное орошение (10 мкм).

Для изучения зависимости процесса осаждения от частоты пульсаций были проведены эксперименты по осаждению пыли ППЖК с использованием орошения и пульсирующей вентиляции при различных частотах пульсатора. В каждом эксперименте контролировались параметры микроклимата, согласно предыдущим экспериментам. Результаты были проанализированы, усреднены, пересчитаны согласно выражению 1 и представлены в виде гистограммы (рис.9).

Зафиксирована наибольшая эффективность осаждения, наблюдающаяся при использовании частоты импульсов в области 13 Гц. Также прослеживается влияние

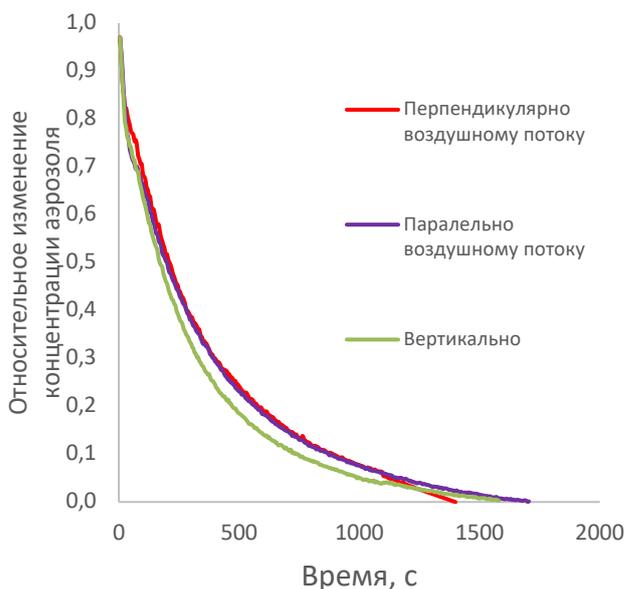
различного режима (частоты) устройства пульсирующей вентиляции. Наименьшее время осаждения при корректировке результатов экспериментов наблюдается при воздействии на аэрозоль с частотой пульсатора в области 13 Гц. Наибольшее время осаждения наблюдается при использовании частоты вращения в области 20 Гц. Рациональная частота вращения статичного сегмента пульсатора находится в области  $\approx 13$  Гц.



*Рисунок 9 – Время осаждения от применения различных частот воздушного пульсатора при осаждении пылеводяного аэрозоля.*

Определено рациональное положение пульсирующего устройства относительно воздушного потока путем проведения экспериментов по различному позиционированию пульсирующего

устройства. Эксперимент по осаждению проводился по аналогичной методике, менялось лишь расположение пульсатора: перпендикулярно, параллельно и вертикально потоку воздуха в исследуемом объеме. Результаты, полученные при экспериментах, были нормированы согласно выражению 1 и сведены в графики, представленные на рисунке 10, показывающие относительное изменение концентрации аэрозоля от времени при различном расположении пульсирующего устройства. Установлено, что при вертикальном расположении пульсатора начальная стадия процесса осаждения происходит с большей интенсивностью, чем при других вариантах расположения, однако при снижении концентрации данный эффект теряется (рис. 10).

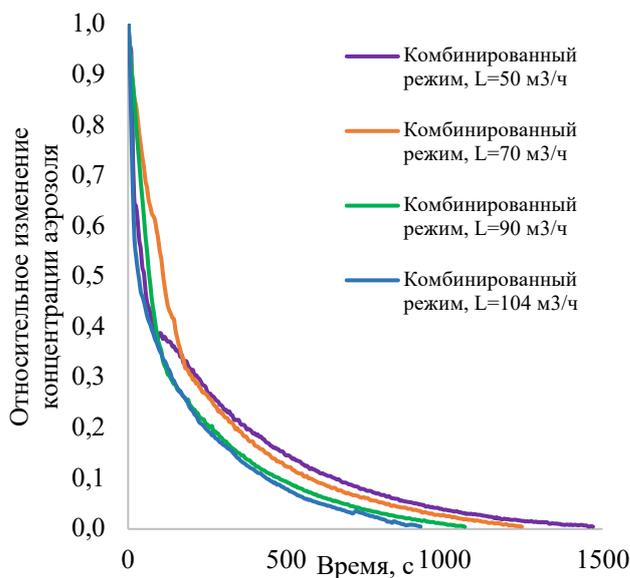


*Рисунок 10 – Зависимость относительного изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени комбинированным методом при различных вариантах расположения пульсатора*

При расположении пульсатора перпендикулярно воздушному потоку начальная стадия процесса осаждения происходит с наименьшей интенсивностью, но на завершающей стадии процесс

осаждения при таком расположении опережает остальные варианты, обеспечивая наименьшую продолжительность процесса в целом (23,3 мин). При расположении пульсатора вертикально (26,3 мин) или параллельно (28,4 мин) воздушному потоку процесс осаждения характеризуется наибольшей продолжительностью.

Для выявления наиболее эффективного значения расхода воздуха, подаваемого на пульсатор, проводились эксперименты (аналогично вышеописанным) по осаждению пыли ППЖК комбинированным методом. Диапазон значений обоснован литературными данными исследования эффективности применения метода пульсирующей вентиляции на шахтах горнодобывающей промышленности. Эксперименты проводились с расходом воздуха, равным 50 м<sup>3</sup>/ч, 70 м<sup>3</sup>/ч, 90 м<sup>3</sup>/ч и 104 м<sup>3</sup>/ч. Обработанные результаты эксперимента (согласно выражению 1) приведены на рисунке 11. Установлено время осаждения исследуемого аэрозоля при использовании различного расхода воздуха. При 50 м<sup>3</sup>/ч время осаждения составило 1470 с, при 70 м<sup>3</sup>/ч – 1245 с, при 90 м<sup>3</sup>/ч – 1065 с.



*Рисунок 11 – Зависимость относительного изменения концентрации аэрозоля от времени, при исследуемых расходах воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор.*

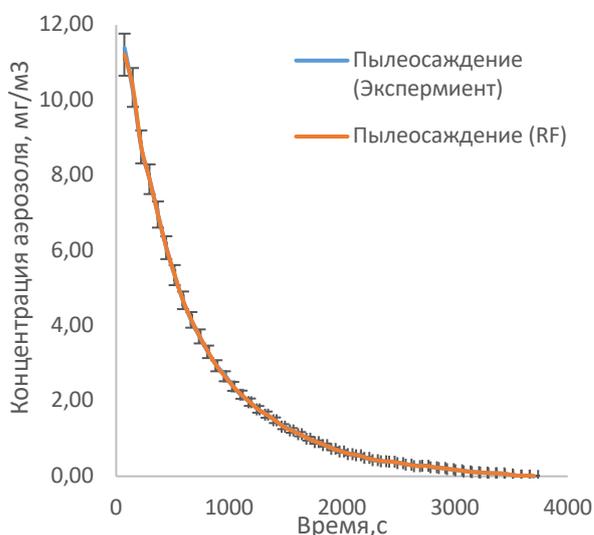
Были выполнены дополнительные эксперименты по определению концентрации аэрозоля гранулометрическим (весовым) методом, обеспечивающим прямую оценку массового содержания дисперсной фракции в воздушном потоке. Сравнительный анализ показал, что расхождение между двумя независимыми способами определения концентрации аэрозоля не превышает 25%, что свидетельствует о высокой согласованности экспериментальных данных и достоверности исследования. Поскольку измерения, выполненные прибором «Аэрокон-П», оказались сопоставимы с результатами весового метода, значения эффективности комбинированного метода осаждения были уменьшены согласно величине погрешности. Такая корректировка позволила компенсировать возможные систематические расхождения между двумя способами измерений. Введение поправки обеспечило более корректное сравнение эффективности комбинированного метода пылеосаждения с традиционным пылеосаждением орошением.

Для обоснования эффективности применения метода пульсирующей вентиляции необходимо разработать математическую модель осаждения частицы пыли. Путем анализа и применения этой математической модели можно определить рациональные параметры применяемых устройств для осаждения пыли.

В третьей главе представлены расчетный аппарат и математическая модель, позволяющие предсказать концентрацию пыли в зависимости от различных параметров. Для разработки математической модели использовались различные наборы (массивы) экспериментальных данных и способы обработки: машинное обучение и математико-статистический метод.

Один из массивов данных использовался для разработки расчетного аппарата определения концентраций аэрозоля при помощи машинного обучения методом «Случайный лес». Поскольку в массиве данных присутствуют параметры эксперимента, представленные в диапазонах (параметры микроклимата и физические характеристики устройств), эти параметры были заведомо исключены из выборки в силу своего постоянства (нулевая дисперсия). Набор данных логарифмировали и разбивали в соотношении 4:1, то есть 80% выборки использовали для обучения модели, а 20% — для ее тестирования. В качестве исходных векторов для обучения использовали векторы, полученные перечислением значений параметров массива. Значение натурального логарифма являлось конечным значением функции.

Проведённый SHAP-анализ (SHapley Additive exPlanations) — метод интерпретации прогнозов моделей машинного обучения, основанный на концепции теории игр (значений Шепли) для определения влияния различных параметров на расчет концентрации аэрозоля установил, что наибольшее влияние оказывают следующие параметры: диаметр форсунки, расход воздуха на пульсаторе и частота пульсаций. Кривые концентрации пыли, полученные с помощью модели машинного обучения и экспериментальных данных представлены на



рисунке 12. Расчетный аппарат, полученный при помощи машинного обучения, наиболее точно согласуется с моделью, а наибольшее количество предсказанных моделью машинного обучения данных находятся в пределах погрешности (не более 1%).

Рисунок 12 - Зависимость концентрации пылеводяного аэрозоля от времени при данных эксперимента и модели машинного обучения.

Разработано специализированное программное обеспечение (ПО), на основе полученной модели машинного обучения. ПО предназначено для расчета изменения концентрации пыли во времени при комбинированному методе осаждения. Пользователь задает ключевые параметры: частоту импульсов, расход воздуха, диаметр форсунки и число временных интервалов (шаг по времени). Результатом является график, отображающий экспоненциальное снижение концентрации пыли под действием аэрогидродинамических факторов. ПО поддерживает режимы прямого и обратного расчета. В первом случае пользователь задает начальную концентрацию пыли, после чего программа вычисляет время, необходимое для ее снижения до нулевого значения. Во втором случае задается максимально допустимое время, а программа определяет достижимую концентрацию пыли при заданных условиях.

Исследована взаимосвязь концентрации пыли во времени (1–120 с) с тремя управляемыми параметрами процесса пылеосаждения: диаметром форсунки (10–20 мкм), частотой пульсаций (1–20 Гц) и расходом воздуха (50–104 м<sup>3</sup>/ч). Экспериментальная матрица (второй массив) включала 15 комбинаций условий (по 25 замеров в каждой), диапазон наблюдаемых концентраций — 4,06–13,60 мг/м<sup>3</sup>. Для оценки вклада факторов применен метод множественной корреляции с расчетом частных коэффициентов и последующей нормировкой параметров; на основе этого введен интегральный показатель качества осаждения  $V_{\text{кач}}$  (относительно ПДК = 0,3 мг/м<sup>3</sup>).

Получено, что наибольшее влияние на эффективность пылеосаждения оказывает расход воздуха (вес 0,173), далее — частота пульсаций (0,137); наименьший вклад вносит диаметр форсунки (0,07). Максимальная оценка качества осаждения в проведенной серии экспериментов достигнута при сочетании: диаметр форсунки 10 мкм, частота 10 Гц, расход воздуха 104 м<sup>3</sup>/ч ( $V_{\text{кач}} = 0,624$ ); минимальная — при 10 мкм, 13 Гц, 50 м<sup>3</sup>/ч ( $V_{\text{кач}}=0,263$ ).

Разработана математическая модель, способная рассчитывать время осаждения аэрозоля до требуемой концентрации. Данная модель представляет собой формулу (2), в которой все параметры процесса осаждения учитываются интегральным показателем, называемым *коэффициентом осаждения*. Результаты расчета коэффициентов осаждения для каждого набора параметров представлены в таблице 1.

$$t_{\text{осаж.}} = 10 \frac{\frac{C_0 - C_{\text{тр.}}}{h} - 1}{3,2} \cdot 5 \quad (2)$$

Где  $t_{\text{осаж.}}$  – расчетное время осаждения, с;

$C_0$  – начальная концентрация аэрозоля, мг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{тр.}}$  – требуемая концентрация аэрозоля, мг/м<sup>3</sup>;

$h$  – коэффициент осаждения, мг/м<sup>3</sup>.

Для проверки полученной формулы оценки времени пылеосаждения выполнено численное моделирование осаждения аэрозоля на основе экспериментальных данных с целью подтверждения воспроизводимости. Фокус сделан на интервале 1–120 с после включения орошения и пульсирующей вентиляции, когда наибольший эффект оказывает коагуляция и усиленное перемешивания частиц пыли с частицами воды. Вне этого диапазона доминируют более медленные механизмы, поэтому выбранный диапазон обеспечивает максимальную чувствительность проверки адекватности формулы.

Таблица 1 - Значение коэффициента осаждения для набора параметров пылеосаждения.

| Позиции | Диаметр форсунки, мкм | Частота пульсаций, Гц | Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч | Коэффициент осаждения, мг\м <sup>3</sup> |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| 1.      | 0                     | 0                     | 0                                 | 0,505                                    |
| 2.      | 10                    | 0                     | 0                                 | 1,610                                    |
| 3.      | 15                    | 0                     | 0                                 | 1,096                                    |
| 4.      | 20                    | 0                     | 0                                 | 1,376                                    |
| 5.      | <b>10</b>             | <b>13</b>             | <b>104</b>                        | <b>1,520</b>                             |
| 6.      | 15                    | 13                    | 104                               | 1,494                                    |
| 7.      | 20                    | 13                    | 104                               | 1,575                                    |
| 8.      | 10                    | 1                     | 104                               | 1,478                                    |
| 9.      | 10                    | 3                     | 104                               | 1,343                                    |
| 10.     | 10                    | 7                     | 104                               | 1,498                                    |
| 11.     | 10                    | 10                    | 104                               | 1,180                                    |
| 12.     | 10                    | 20                    | 104                               | 1,286                                    |
| 13.     | 10                    | 13                    | 50                                | 1,512                                    |
| 14.     | 10                    | 13                    | 70                                | 1,278                                    |
| 15.     | 10                    | 13                    | 90                                | 1,673                                    |

Графики зависимости моделирования процесса пылеосаждения орошением, результаты которого представлены на рисунке 13, показывают, что при орошении без пульсаций наилучшая динамика снижения концентрации достигается при использовании форсунки диаметром 10 мкм: спад концентрации наиболее выражен на начальном отрезке 1–120 с.

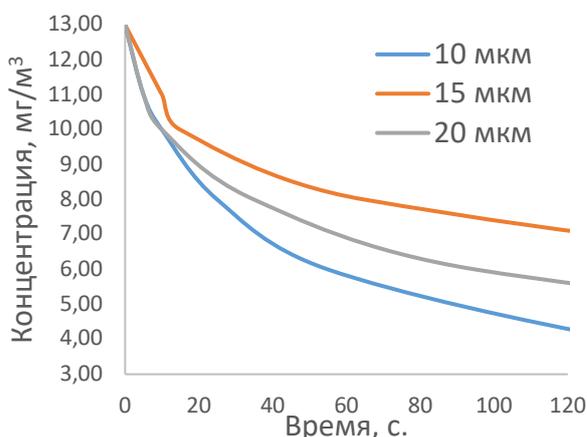
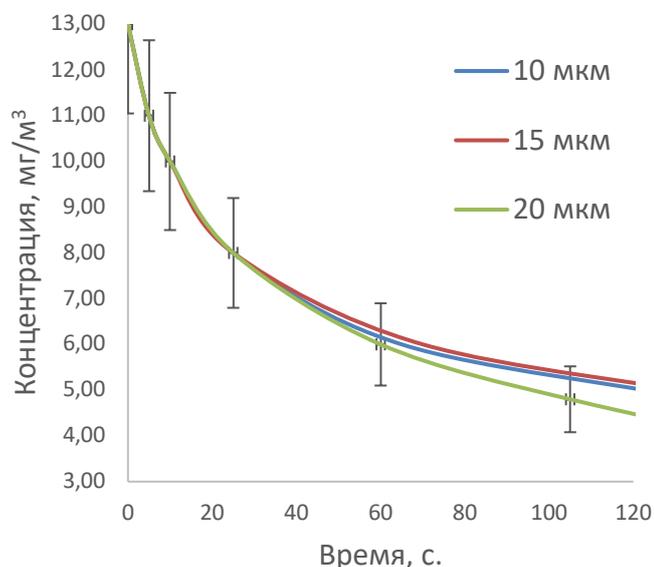


Рисунок 13 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с изменением диаметра форсунок (в первые 120с).

В комбинированном режиме (орошение + пульсирующая вентиляция, 13 Гц; 104 м<sup>3</sup>/ч) кривые зависимостей концентрации от времени

для диаметров форсунок 10–20 мкм схожи друг с другом. В первые 120 с различия не превышают ~15% (практически идентичная эффективность) в указанных режимах характерен переход от исходных ~12–13 до ~4–5 мг/м<sup>3</sup> за 120 с (рис. 14).

Рисунок 14 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении диаметра форсунок (в первые 120 с).



Варьирование частоты пульсаций (1–20 Гц) при d=10 мкм и расходе 104 м<sup>3</sup>/ч подтверждает частотную зависимость темпа осаждения: наиболее значительный начальный спад наблюдается при частоте в 13 Гц (рис. 15), что также согласуется с экспериментальными данными и результатами, полученными при использовании расчетного аппарата.

Изменение расхода (50, 70, 90, 104 м<sup>3</sup>/ч) при d=10 мкм и 13 Гц приводит к кривым, которые почти совпадают для 90 и 104 м<sup>3</sup>/ч и описывают более быстрое снижение концентрации, чем при 70 м<sup>3</sup>/ч; кривая для 50 м<sup>3</sup>/ч занимает промежуточное положение (рис. 16).

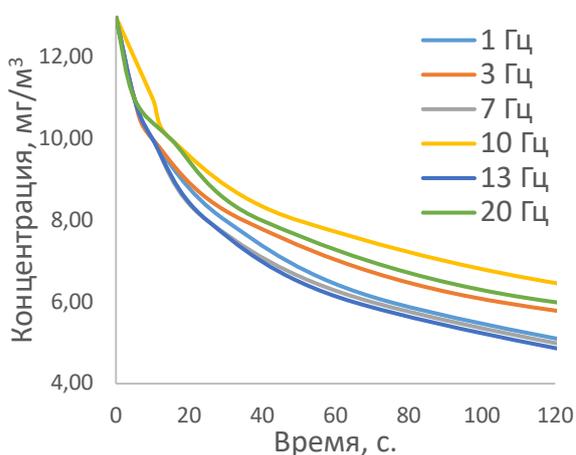


Рисунок 15 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении частоты пульсаций (в первые 120 с).

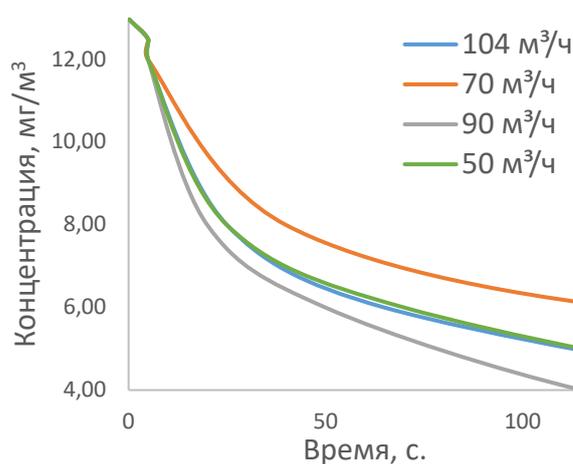


Рисунок 16 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при различных значениях расхода воздуха (в первые 120 с)

Установлена воспроизводимость ранее полученной формулы расчета времени осаждения при помощи численного моделирование процесса пылеосаждения. Определены рациональные параметры комбинированного метода (орошение + пульсирующая вентиляция): использование форсунки с диаметром сопла 10 мкм обеспечивает наибольшую интенсивность снижения концентрации в период от 0–120 с (различия с 20 мкм в начальной фазе не превышают ~15%).

При варьировании частоты рациональным значением является 13 Гц, тогда как частоты 1–3 Гц обеспечивают более плавное снижения концентрации пыли, а 10 Гц приводит к наибольшей длительности процесса пылеосаждения. Анализ результатов моделирования при варьировании расхода воздуха выявил практически идентичную эффективность режимов 90 и 104 м<sup>3</sup>/ч, при этом 50 м<sup>3</sup>/ч дает схожую, но несколько более длительную динамику, а 70 м<sup>3</sup>/ч — наибольшее замедление процесса осаждения аэрозоля.

**В четвертой главе** представлена апробация комбинированного метода осаждения в промышленных условиях. Необходимо отметить, что рассчитанные значения числа Рейнольдса для производственного участка разгрузки ППЖК и лабораторной установки составляют одинаковую величину  $Re = 2,65 \times 10^5$ . Это обеспечивает динамическое подобие потоков воздуха для этих случаев, что гарантирует корректность переноса результатов лабораторных экспериментов на реальные условия производства. Следовательно, процессы пылеосаждения и аэродинамические явления, наблюдаемые в лабораторной установке, адекватно отражают процессы, протекающие при разгрузке ППЖК на агломерационном производстве горно-металлургического предприятия.

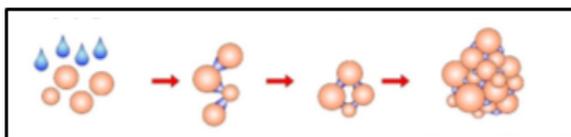
Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование импульсов давления ( $\Delta p$ ), возникающих при разности скоростей воздушного потока ( $\Delta v$ ), способствует интенсификации коагуляции частиц с каплями влаги и, как следствие, ускоренному выпадению укрупненных структур из воздуха рабочей зоны. В результате время осаждения пылевых частиц сокращается с  $\approx 36$  до  $\approx 16$  минут, при этом уменьшается расход воды и исключается переувлажнение поверхностей (рис. 17). Таким образом, метод пульсирующей вентиляции обеспечивает повышение эффективности пылеподавления более, чем в два раза по сравнению с традиционными системами, обеспечивая равномерность осаждения по объему и высоте рабочей зоны.

Проведенные эксперименты показали, что использование комбинированного метода пылеосаждения обеспечивает оптимизацию процессов захвата пылевых частиц различного фракционного состава, снижает расход воды и предотвращает переувлажнение поверхностей оборудования, технологических помещений, емкостей для пересыпки и хранения.

Применение данного подхода способствует уменьшению эксплуатационных затрат и увеличению долговечности конструкционных элементов технологических установок.

### Пылеосаждение орошением

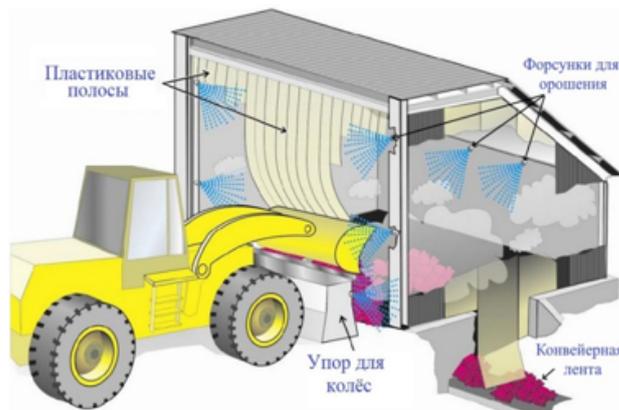
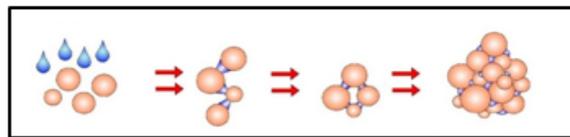
$$v = \text{const};$$



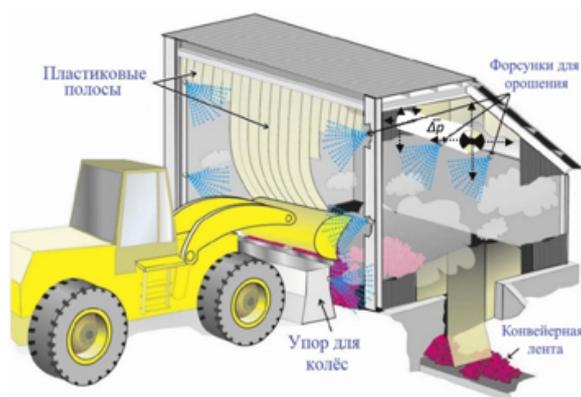
где,  $v$  – скорость частицы (структуры) (м/с);  $a$  – ускорение (м/с<sup>2</sup>);  $t$  – время (с);  $\Delta v$  – разность скоростей при пульсирующем режиме движения воздуха.

### Совместный (комбинированный) метод

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{const};$$



Время осаждения согласно эксперименту – 36 мин.  
Время осаждения согласно расчету – 43 мин.  
(погрешность <20%)



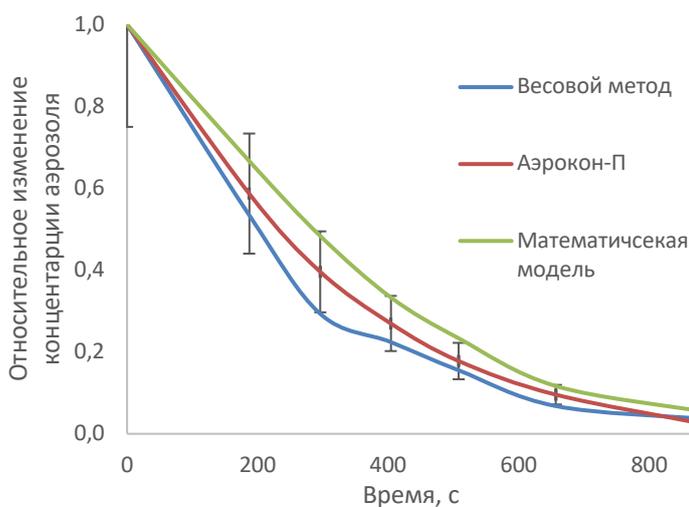
Время осаждения согласно эксперименту – 16 мин.  
Время осаждения согласно расчету – 16 мин.

Рисунок 17 - Повышение эффективности пылеосаждения комбинированным методом при подготовке (разгрузке) продуктов железорудного концентрата.

Снижение запыленности воздушной среды уменьшает абразивный и коррозионный износ деталей транспортных систем, повышая межремонтный ресурс агрегатов и стабильность показателей надежности оборудования. Повышение эффективности пылеосаждения положительно отражается на безопасности труда, улучшая видимость, санитарно-гигиенические условия и снижая риск аварийных ситуаций.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации вентиляционных и пылеосадительных систем на объектах горно-металлургического комплекса, обеспечивая повышение ресурса оборудования и формирование устойчивой безопасной технологической среды. Полученные экспериментальные данные об осаждении аэрозольных частиц, определенные весовым методом, с использованием прибора «Аэрокон-П» и по результатам математического моделирования, демонстрируют расхождение не более 25 % (рис. 18), что подтверждает достоверность экспериментальных наблюдений и корректность численных подходов. С учетом выявленной погрешности эффективность комбинированного метода пылеосаждения относительно традиционного орошения была пересчитана и снижена с 50 до 37,5 %, что

отражает реальную степень улавливания частиц (снижение времени осаждения примерно в 1,4 раза).



*Рисунок 18 – Сводный график зависимости относительного изменения концентрации аэрозоля от времени при использовании весового метода измерения концентрации, измерителя «Аэрокон-П» и расчете математической моделью.*

Проведенные пробные испытания на полимерперерабатывающем предприятии ООО «ЛаймУпак» показали, что эффективность комбинированного метода осаждения аэрозолей по отношению к орошению составляет 30–40 %.

Таким образом, согласно предложенным моделям, можно математически предсказать значение концентрации пыли согласно значению параметров, описанных в экспериментах по осаждению. Расчетный аппарат, основанный на машинном обучении, позволяет более точно определять время осаждения аэрозоля, снижая чувствительность к ошибкам в расчете концентрации. Рекомендованными значениями параметров при комбинированном осаждении пыли являются: диаметр форсунки  $\approx 10$  мкм; частота пульсаций  $\approx 13$  Гц; расход воздуха - 90–104 м<sup>3</sup>/ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной для горно-металлургической отрасли задачи повышения эффективности пылеосаждения на участке подготовки продуктов железорудного концентрата на основе применения разработанного комбинированного метода орошения с дополнительным использованием пульсирующей вентиляции, что позволяет обеспечить снижение времени осаждения пыли руды железной агломерационной в 1,4 раза при рациональных параметрах, приводящих к повышению надежности технологического оборудования и обеспечению необходимого уровня промышленной безопасности по пылевому фактору. Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Экспериментально доказано, что применение пульсирующей вентиляции для осаждения пыли повышает эффективность жидкостного орошения не менее чем на 37%.

2. Разработанная математическая модель осаждения пыли железорудного концентрата позволяет оценить время осаждения пыли с учетом обоснованных рациональных параметров (диаметр форсунки орошения, расход воздуха в пульсаторе и частота пульсаций).

3. Разработанный расчетный аппарат на основе машинного обучения методом случайного леса, полученный на основе физического моделирования, хорошо согласуется с лабораторными экспериментами: коэффициент детерминации при тренировочном наборе  $R^2=0,998$ , а среднеквадратичное отклонение  $СКО=0,069$  мг/м<sup>3</sup>, при тестовом наборе  $R^2=0,987$ , а  $СКО=0,174$  мг/м<sup>3</sup>.

4. Применение рациональных параметров орошения и пульсирующей вентиляции позволяет снизить время осаждения пыли, способствуя снижению безвозвратных потерь при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата.

5. Рациональными параметрами следует считать: форсунка диаметром  $\approx 10$  мкм; расход воздуха внутри воздуховода, подающаяся на пульсатор – 90 - 104 м<sup>3</sup>/ч; частота импульсов  $\approx 13$  Гц.

6. Разработанная математическая модель и расчетный аппарат машинного обучения позволяют по заданным параметрам предсказывать концентрацию пыли и оценивать время ее осаждения (даже при погрешностях в расчете концентрации).

7. Применение подтвержденных рациональных параметров орошения и пульсирующей вентиляции способны повысить уровень безопасности (время осаждения, концентрацию пыли) на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата по пылевому фактору и снизить пылевую нагрузку на технологическое оборудование, повышая его надежность снижая аварийность.

8. Метод пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции, разработанный в рамках диссертационной работы, был испытан в условиях ООО «ЛаймУпак»; получено снижение продолжительности осаждения аэрозоля на треть по сравнению с методом осаждения пыли орошением.

### Результаты исследований отражены в следующих публикацияхавтора:

1. Курносов, И. Ю. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата / И. Ю. Курносов, А. Э. Филин, С. В. Тертычная // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 41-49. – DOI 10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49. – EDN WDNKXY **(ВАК)**.
2. Результаты исследования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамической связи при пульсирующем режиме вентиляции / А. Э. Филин, В. А. Филина, С. В. Тертычная, И.Ю. Курносов, И.С. Колбина, Д.Э. Пронина // Безопасность техногенных и природных систем. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 22-31 **(ВАК)**.
3. Курносов, И. Ю. Исследование воздействия звука на изменение запыленности на объектах горного производства / И. Ю. Курносов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S14. – С. 21-28. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-5-14-21-28. – EDN MLVINI **(Scopus)**.
4. Курносов И. Ю. О перспективе управления пылевой нагрузкой на горнометаллургическом производстве посредством акустического воздействия / И. Ю. Курносов, А. Э. Филин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № S1-1. – С. 47-57. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72. – EDN DOLTCO **(Scopus)**.
5. «К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты» Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А., Овчинникова Т.И., Колесников А.С. Уголь. 2022. № 9 (1158). С. 67-72. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72. – EDN DOLTCO **(Scopus)**.
6. Курносов И.Ю. «Оценка влияния параметров орошения на скорость пылеосаждения в горных выработках» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 150–162. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_150 **(Scopus)**.
7. Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах / А.Э. Филин, С.В. Тертычная, И.Ю. Курносов и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76 **(Scopus)**.
8. Оценка влияния пульсирующей вентиляции на пылеосаждение орошением в горнодобывающем и перерабатывающем производстве / А. Э. Филин, И. Ю. Курносов, С. В. Тертычная, Л. А. Колесникова // Уголь. – 2023. – № 11(1173). – С. 120-124. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-11-120-124. – EDN ANREEG **(Scopus)**.
9. Исследование возможности применения метода пульсирующей вентиляции на этапе разгрузки железорудного концентрата / А. Э. Филин, И. Ю. Курносов, С. В. Тертычная, Р. А. Кондрашев // Черные металлы. – 2024. – № 8. – С. 77-81. – DOI 10.17580/chm.2024.08.09. – EDN UVPQLX **(Scopus)**.
10. Donayev A.E., Filin A.E., Kolesnikov A.S., Kurnosov I.Yu., Tertychnaya S.V., Nazmi M.N., Mamitova A.D., Kolesnikova O.G. Research on air purification from pulverized large-tonnage tailings of non-ferrous metal ores and the possibility of their use as secondary raw materials. Construction Materials and Products. 2025. 8 (6). 1. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-6-1 **(Scopus)**.