

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

На правах рукописи

Курносов Илья Юрьевич

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

Шифр и наименование научной специальности
2.10.3 «Безопасность труда»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2026

Содержание

Введение.....	4
1. Анализ источников пылевого загрязнения горно-металлургических предприятий. Причины, следствия и способы локализации.....	12
1.1 Анализ аварийности и производственного травматизма на горно-металлургических предприятиях.....	17
1.2 Способы борьбы с пылью на территории горно-металлургических предприятий.....	23
1.2.1 Мокрые способы пылеподавления.....	23
1.2.2 Пылеподавление при помощи пенообразователя.....	30
1.2.3 Сухие пылеулавливающие и сепарационные устройства.....	32
1.2.4 Озеленение территории производства.....	36
1.2.5 Перспектива применения пульсирующей вентиляции в локальных вытяжных системах для осаждения пыли.....	38
1.2.6 Перспектива применения пульсирующей вентиляции при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата.....	40
Выводы по главе 1.....	47
2. Исследование процесса массопереноса в условиях повышенной запыленности участка ППЖК агломерационного производства горно-металлургического предприятия в лабораторных условиях.....	49
2.1 Разработка методики эксперимента.....	49
2.2 Подготовка навесок пыли железной агломерационной руды участка ППЖК	53
2.2.1 Рентгенофазовый анализ и рентгенофлуоресцентный исследуемой пыли.....	53
2.2.2 Измельчение и просеивание исследуемой пыли.....	55
2.2.3 Гранулометрический анализ пыли продуктов подготовки железорудного концентрата.....	57
2.3 Определение массы навески пыли, используемой в экспериментах по осаждению.....	59
2.4 Схема и параметры проведения эксперимента.....	60
2.5 Проведение эксперимента по осаждению пыли.....	63
2.6 Проведение эксперимента по осаждению пыли орошением.....	65
2.7 Проведение эксперимента по осаждению пыли орошением с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции.....	68
2.8 Исследование изменения концентрации аэрозоля от времени в зависимости от частоты вращения воздушного пульсатора.....	70
2.9 Исследование изменения концентрации аэрозоля от времени в зависимости от расхода воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор.....	73

2.10 Обработка результатов экспериментов.....	75
Выводы по главе 2.....	86
3. Математическое моделирование комбинированного метода осаднения пыли руды железной агломерационной участка разгрузки ППЖК.....	88
3.1 Разработка математической модели осаднения пыли комбинированным методом, с помощью машинного обучения.....	89
3.2 Разработка математической модели осаднения аэрозоля математико-статистическими методами обработки экспериментальных данных.....	100
3.2.1 Обработка экспериментальных данных по пылеосаднению комбинированным методом путем математико-статистических преобразований.....	100
3.2.2 Моделирование процесса пылеосаднения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции.....	115
Выводы по главе 3.....	123
4. Апробация метода комбинированного осаднения пыли руды железной агломерационной в промышленных условиях.....	126
4.1 Подтверждение подобия процессов осаднения в лабораторных и промышленных условиях путем расчета числа Рейнольдса.....	126
4.2 Оценка погрешностей измерения и уточнение эффективности комбинированного метода пылеподавления.....	129
4.3 Сравнительная оценка эффективности осаднения орошением и комбинированного метода пылеосаднения при разгрузке ППЖК.....	130
Выводы по главе 4.....	135
Заключение.....	136
Список литературы.....	140
Приложения.....	160

Введение

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).

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.

Публикации. Результаты работы отражены в семи печатных статьях:

1. Курносков, И. Ю. Исследование воздействия звука на изменение запыленности на объектах горного производства / И. Ю. Курносков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S14. – С. 21-28. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-5-14-21-28. – EDN MLVINF;

2. Курносов И. Ю. О перспективе управления пылевой нагрузкой на горно-металлургическом производстве посредством акустического воздействия / И. Ю. Курносов, А. Э. Филлин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № S1-1. – С. 47-57. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72. – EDN DOLTCO.

3. «К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты» Филлин 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.

4. 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.

5. Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах / А.Э. Филлин, С.В. Тертычная, И.Ю. Курносов и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.

6. Оценка влияния пульсирующей вентиляции на пылеосаждение орошением в горнодобывающем и перерабатывающем производстве / А. Э. Филлин, 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.

7. Курносов, И. Ю. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата / И. Ю. Курносов, А. Э. Филлин, 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.

8. Исследование возможности применения метода пульсирующей вентиляции на этапе разгрузки железорудного концентрата / А. Э. Филлин, 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.

9. Результаты исследования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамической связи при пульсирующем режиме вентиляции / А. Э. Филлин, 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.

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

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.

1. Анализ источников пылевого загрязнения. Причины, следствия и способы локализации

Пылевое загрязнение на территории современных предприятий металлургической промышленности относится к одной из актуальнейших проблем современного производства. Наибольший вклад в пылевое загрязнение от металлургических предприятий вносят процессы пылевыведения от различных производственных источников, таких как: агломерационное, доменное, сталеплавильное, прокатное, ферросплавное производства, производство окатышей (подготовка железорудного концентрата) [1].

Такие источники покрывают достаточно большие площади не только производственных площадок, но и природных массивов. Впоследствии на таких площадках происходят вторичные процессы пылеобразования, способствующие распространению пыли на большие расстояния. К примеру, с одного гектара площади за сутки может образовываться от 2 до 5 тонн пыли. При превышении значения массы такой пыли за один месяц 58 кг/га наблюдается снижение нормальной жизнедеятельности не только животного мира, но и большинства растений данной местности [2].

Пыли, образующиеся в металлургических процессах, подразделяются на грубодисперсные и тонкодисперсные. Образование грубых пылей связано с воздействием газового потока на мелкие частицы перерабатываемой шихты или продукта металлургической переработки; такие пыли, как правило, имеют осколочную форму, а размеры их частиц варьируются от 3–10 до нескольких сотен микрометров. Химический состав грубых пылей, как правило, соответствует составу исходного материала. Тонкие пыли формируются преимущественно вследствие возгонки легколетучих компонентов, уносимых газовым потоком, и при охлаждении среды конденсируются в твердые частицы или капли. Возгоны при этом обогащаются летучими элементами, такими как цинк, кадмий, свинец, германий, индий и другие редкие и рассеянные элементы. [3].

От интоксикации пылью на предприятиях черной металлургии страдает и человек. Загрязнение пылью происходит практически на всех этапах производства. Наибольшее количество пыли производится в таких технологических процессах, как спекание агломерационной шихты, охлаждение агломерата и возврата, обжиг окатышей. При очистке, погрузке и транспортировке процессы образования пыли наиболее активны, поскольку пыль выбрасывается в воздух на рабочих местах [4].

Металлургическое производство является одним из основных загрязнителей окружающей среды, причем на всех стадиях. При агломерационных процессах в воздух выбрасываются пыль, сернистый газ и оксиды углерода. В электросталеплавильном производстве при выпуске 1 млн. т. стали выбрасывается максимальное количество загрязняющих веществ (табл. 1). Приведенные в таблице данные дают представление о количестве вредных веществ, выбрасываемых металлургическим производством в атмосферный воздух [5].

Таблица 1 – Выбросы (т/сутки) в атмосферу при производстве 1 млн. т. стали

Производство	Твердые частицы	Сернистый газ	Оксид углерода
Огнеупорное	84	0,3	0,2
Ферросплавное	2,1	0,3	5,0
Агломерационное	91	14,5	250
Коксохимическое	1	1,3	14,2
Доменное	11	3,3	10,6
Конверторное	7	1,2	1,5
Электросталеплавильное	1,1	0,3	-
Мартеновское	14	1,2	0,7
Энергоснабжение	223	13,3	-
прочие	66,7	10,8	78

Наиболее значительными источниками пылеобразования в машиностроительном производстве являются гальванические цехи. В составе воздушных выбросов, удаляемых из таких цехов, загрязняющие вещества

присутствуют в виде пылевых частиц, тонкодисперсного аэрозольного тумана, паров и газообразных компонентов. Наибольшая интенсивность выделения вредных веществ наблюдается при выполнении операций кислотного и щелочного травления металлических поверхностей. Количественное значение массы вредных веществ, выделяющихся в процессе травления с зеркала ванны, определяется произведением удельной интенсивности выделения загрязняющих компонентов с единицы площади зеркала ванны на общую площадь её поверхности [6].

В ходе выполнения подготовительных операций в гальванических цехах, таких как механическая очистка и обезжиривание металлических поверхностей, в воздух рабочей зоны поступают пылевые частицы, пары органических растворителей (бензина, керосина, трихлорэтилена), а также туманы щелочных растворов. Исследование дисперсного состава образующихся туманов показало, что размер частиц составляет 5–6 мкм при операциях травления, 8–10 мкм при хромировании и 5–8 мкм при цианистом цинковании. Полученные данные свидетельствуют о тонкодисперсной структуре аэрозолей и их высокой способности к распространению в воздушной среде [6].

В цехах механической обработки металлов при работе станочного оборудования в воздух производственных помещений выделяются пыль, металлическая стружка, а также туманы масел и эмульсий, образующиеся в результате технологических процессов резания и охлаждения. Указанные загрязняющие вещества через системы вентиляции удаляются за пределы рабочих зон. В таблице 2 представлено количество паров воды, а также туманов масел и эмульсий, выделяющихся в течение одного часа работы станков, рассчитанное на 1 кВт установленной мощности электродвигателей, используемых в станочном оборудовании [6].

Средний диаметр частиц пыли, образующейся при работе заточных станков инструментального цеха, составляет 38 мкм при среднеквадратичном отклонении 1,64. Плотность данных пылевых частиц равна 4,23 г/см³, что указывает на высокое содержание минеральных и металлических компонентов. Пыль, формирующаяся в

процессе абразивной обработки, включает 30–40 % материала абразивного круга и 60–70 % материала обрабатываемого изделия.

Таблица 2 – Количество паров воды, туманов масел и эмульсий, выделяющихся за 1 ч работы станков

Оборудование	Масса, г		
	Пары воды	Масляный туман	Туман (эмульсия)
Металлорежущие станки при масляном охлаждении	-	0,2	-
Металлорежущие станки при эмульсионном охлаждении	150	-	0,0063
Шлифовальные станки при охлаждении эмульсией и содовым раствором	150	-	0,165
Шлифовальные станки при охлаждении маслом	-	30	-

Одними из наиболее загрязнённых этапов технологического процесса горно-металлургического комплекса являются агломерационное производство и производство железорудного концентрата. Интенсивное пылеобразование наблюдается в операциях дробления, грохочения и транспортировки материалов. Рабочие, занятые на данных участках, подвергаются воздействию пыли с концентрацией, варьирующейся в пределах от 0,5 до 1 г/м³. Газовая фаза, образующаяся в процессе спекания шихты, содержит оксиды серы и углерода, тогда как пылевая фракция включает соединения железа и его оксидов, а также оксиды марганца, магния, фосфора, кремния, кальция и, в отдельных случаях, частицы титана, меди и свинца. Концентрация пыли при осуществлении указанных технологических операций колеблется в широких пределах и, как правило, существенно превышает установленные предельно допустимые значения [7].

Воздействие пылевых аэрозолей на работников металлургического производства приводит к развитию выраженных нарушений дыхательной функции, проявляющихся тяжёлой одышкой, кашлем с отделением мокроты и

общей слабостью. Наиболее распространёнными профессиональными заболеваниями при этом являются лёгочный фиброз, пневмокониоз, хронический и пылевой бронхит, а также кониотуберкулёз. Кроме того, у работников металлургических цехов часто наблюдаются простудные и гнойничковые заболевания кожи, воспаления мышечной и нервной тканей, включая миозиты и невриты. Указанные патологические состояния нередко приводят к значительному снижению жизненного потенциала человека и могут иметь летальный исход. Вредное воздействие пыли распространяется также на оборудование металлургических предприятий: пылевые отложения оседают на узлах производственной цепочки, в частности на доменных печах, железнодорожных путях, приводах вагоноопрокидывателей и других элементах технологической инфраструктуры, вызывая их преждевременный износ и снижение эффективности работы [8].

Основным фактором, воздействующим на техническое состояние металлургической техники, а также различных механизмов и агрегатов эксплуатирующийся на территории производства черной металлургии, является абразивное изнашивание. Степень износа деталей зависит от загрязнения абразивными частицами масла и топлива. Загрязнение происходит в результате попадания пыли через воздушные фильтры и другие системы с низкой плотностью. Если же системы фильтрации имеют низкую эффективность или неисправны, то повышенный износ деталей достигается попаданием пыли и ее агломерированию на поверхностях трения. Безусловно, металлургическая пыль оказывает негативное воздействие не только в механическом аспекте, но и вызывает широкий спектр серьезных технических и эксплуатационных проблем, затрагивающих различные компоненты и системы оборудования. К числу таких проблем следует отнести:

- повреждение и ухудшение оптических элементов, что снижает точность и эффективность измерительных и контролирующих приборов;
- деградацию смазочных материалов, приводящую к увеличению трения, износу деталей и, как следствие, сокращению срока службы механизмов;

- разрушение изоляторов и чувствительных датчиков, что может привести к сбоям в работе электрических и электронных систем;
- перегрев оборудования вследствие осаждения пылевого слоя на теплоотводящих поверхностях, что часто вызывает короткие замыкания и повреждение электрических цепей;
- нарушение корректной работы микросхем и элементов высокоточного оборудования, вследствие чего снижается надежность и функциональность сложных технологических установок [9].

Совокупность указанных факторов оказывает деструктивное воздействие на техническое состояние деталей и узлов оборудования горно-металлургических предприятий и транспортных систем, приводя к их преждевременному износу, снижению надежности технологических процессов, ухудшению качества продукции и росту аварийности. Увеличение доли аварийного оборудования повышает техногенные риски, вероятность несчастных случаев и может обуславливать временную или полную остановку производственных объектов, вызывая значительные экономические потери. В связи с этим негативное воздействие металлургической пыли следует рассматривать как комплексную проблему, требующую системных технических и организационных мер по ее снижению и предотвращению ущерба при эксплуатации высокотехнологичного оборудования [10–14].

1.1 Анализ аварийности и производственного травматизма на горно-металлургический предприятиях

Согласно статистическим данным, пылевая нагрузка на предприятиях горно-металлургического комплекса является одной из наиболее высоких среди всех промышленных отраслей. Концентрация пыли в воздухе рабочих зон может превышать допустимые санитарно-гигиенические нормы в 100 и более раз. Это создает существенные риски для здоровья работников, в первую очередь связанные с заболеваниями дыхательной системы. В металлургическом производстве 69%

работников подвергаются воздействию вредных и опасных факторов, включая высокую температуру, токсичные газы и пылевые аэрозоли. Из них 21,9% сталкиваются с воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), что в долгосрочной перспективе значительно повышает вероятность профессиональных заболеваний, таких как пневмокониоз (рис. 1) [15].

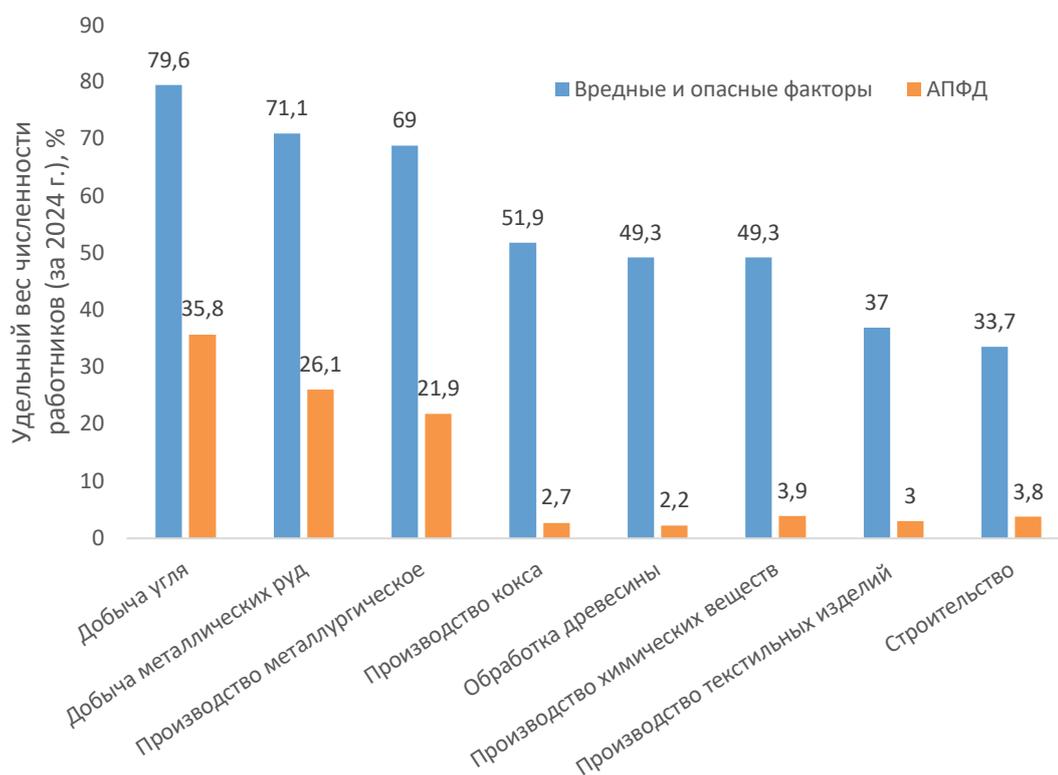


Рисунок 1 - Удельный вес численности работников предприятий, работающих под воздействием вредных и опасных факторов и АПФД, в зависимости от видов промышленности (2024 г.) [15]

Добыча металлических руд также характеризуется высоким уровнем вредного воздействия. В этой отрасли доля работников, подверженных неблагоприятным условиям труда, составляет 71,1%, из них 26,1% сталкиваются с АПФД. Основными источниками аэрозолей являются дробление и переработка руд, процессы погрузки и транспортировки. Неблагоприятные условия труда в этих отраслях оказывают значительное влияние на здоровье сотрудников, что требует

постоянного мониторинга состояния рабочей среды и внедрения более эффективных мер по охране труда.

Особого внимания требует доля работников горно-металлургической отрасли, подвергающихся воздействию аэрозолей преимущественно фиброгенного действия на фоне других факторов производственной среды. Согласно данным, представленным на рисунке 2, наибольший удельный вес воздействий приходится на шум (29,7%), далее следуют тяжесть и напряжённость труда (23,5%), химические факторы (14,4%) и АПФД (12,6%). Существенно меньшая доля работников испытывает влияние вибрации (5,1%), микроклимата (9,6%), неионизирующее и ионизирующее излучение (2% и 0,9% соответственно), световой среды (2,3%) и биологических факторов (0,1%), что подчёркивает относительную значимость аэрозольного фактора среди вредных условий труда.

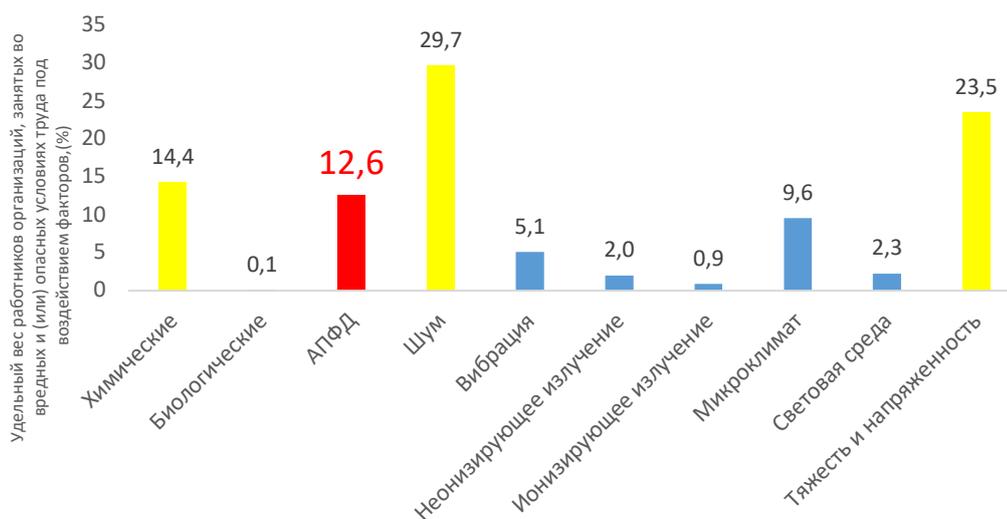


Рисунок 2 - Гистограмма удельного веса работников организаций, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда в зависимости от воздействующих на них факторов производственной среды и трудового процесса (2024 г.) [16]

Эти данные свидетельствуют о том, что основные риски для работников связаны с физической и психоэмоциональной нагрузкой, а также с воздействием шума и пылевых аэрозолей. Высокий процент воздействия АПФД подчеркивает

необходимость применения эффективных технологий для снижения уровня пыли, таких как системы пылеулавливания, вентиляции и индивидуальные средства защиты. Это свидетельствует о необходимости разработки и внедрения специализированных технологий для контроля и снижения концентрации пылевых аэрозолей в воздухе. Например, использование методов пульсирующей вентиляции и орошения пыли может стать эффективным решением для минимизации воздействия АПФД (рис. 2) [16].

Согласно статистике профессиональной заболеваемости (рис. 3), наибольший вклад в формирование профессиональных заболеваний вносят добывающие и обрабатывающие производства. В период 2016–2024 гг. удельный вес заболеваний в сфере добычи полезных ископаемых стабильно сохраняется на уровне около 40%, что указывает на длительное и интенсивное воздействие неблагоприятных факторов производственной среды, включая пылевые аэрозоли, повышенные температуры и шум. В обрабатывающих производствах данный показатель составляет порядка 30%, что обусловлено применением вредных химических веществ и высокой напряжённостью технологических процессов, при этом в целом за анализируемый период отмечается рост профессиональной заболеваемости на фоне тенденции к снижению в добывающей отрасли [17].



Рисунок 3 – Диаграмма удельного веса профессиональных заболеваний работников в зависимости от отрасли индустрии в период с 2016 – 2024 г. [17]

Профессиональная заболеваемость во всех отраслях остаётся относительно стабильной, при этом транспортировка и хранение составляют 10–15%, сельское хозяйство и строительство менее 10%, что подчёркивает необходимость усиления мер по улучшению условий труда, особенно в добыче полезных ископаемых и обрабатывающих производствах. Согласно данным, представленным на рисунке 4, заболеваемость в каждой из исследуемых категорий демонстрирует характерные особенности. Наибольшее значение доли заболеваемости, связанной с воздействием физических факторов, была зарегистрирована в 2019 году и составила 51,15%. Минимальные значения для данной категории наблюдались в 2021 году, достигнув уровня 42,17%. Заболеваемость, вызванная воздействием промышленных аэрозолей, показала максимальное значение в 2017 году (16,37%), а минимальное — в 2020 году (10,91%).

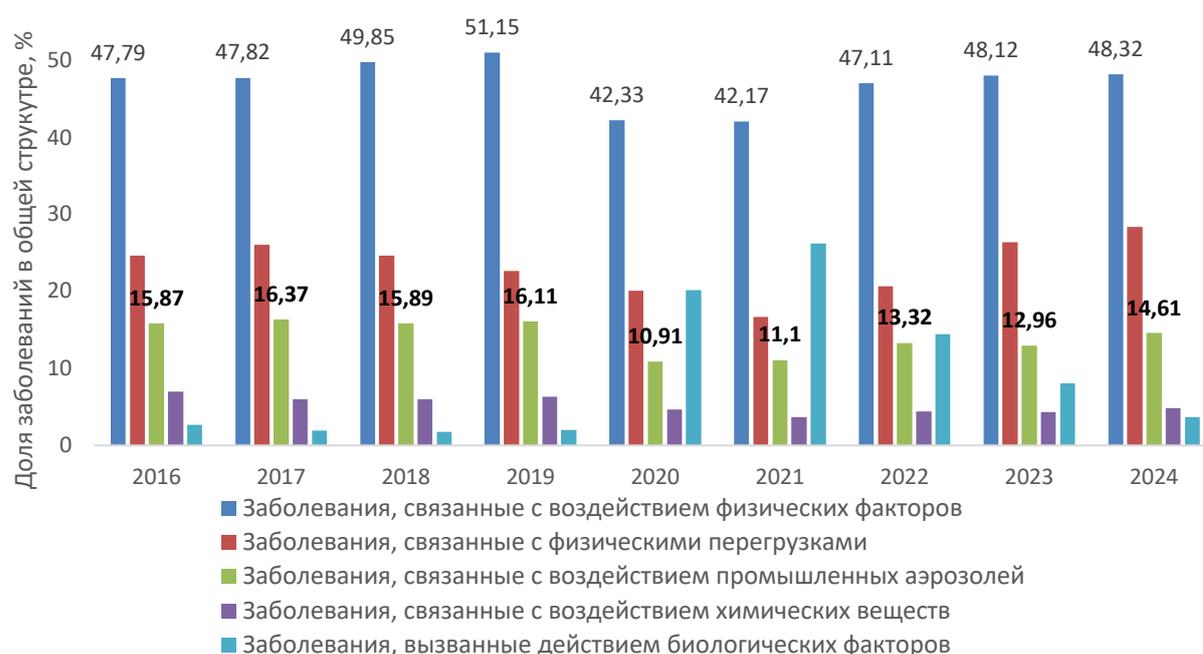


Рисунок 4 –Распределение профессиональных заболеваний работников в зависимости от вредных факторов, провоцирующего заболевание в период с 2016 – 2024 г. [18]

Заболеваемость, обусловленная физическими перегрузками и перенапряжением, демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению в период с

2016 по 2021 годы, достигая минимального значения в 2021 году на уровне 16,74%. Такая динамика может свидетельствовать о частичной эффективности реализованных профилактических мероприятий, направленных на снижение вредного воздействия. Однако, в период 2021–2024 гг наблюдается стремительный рост заболеваний, связанных с воздействием физических факторов, до 28,44% в 2024 году.[18].

В период 2016–2020 гг. заболеваемость, связанная с воздействием промышленных аэрозолей, снижалась с 15,87 % до 10,91 %, что отражает улучшение условий производственной среды и эффективность мероприятий по пылеподавлению, однако с 2021 года показатель вновь растёт до 14,61 % в 2024 году, подтверждая значимость промышленных аэрозолей как третьего по опасности фактора производственной среды и высокий удельный вес их концентрации в воздухе рабочей зоны [19].

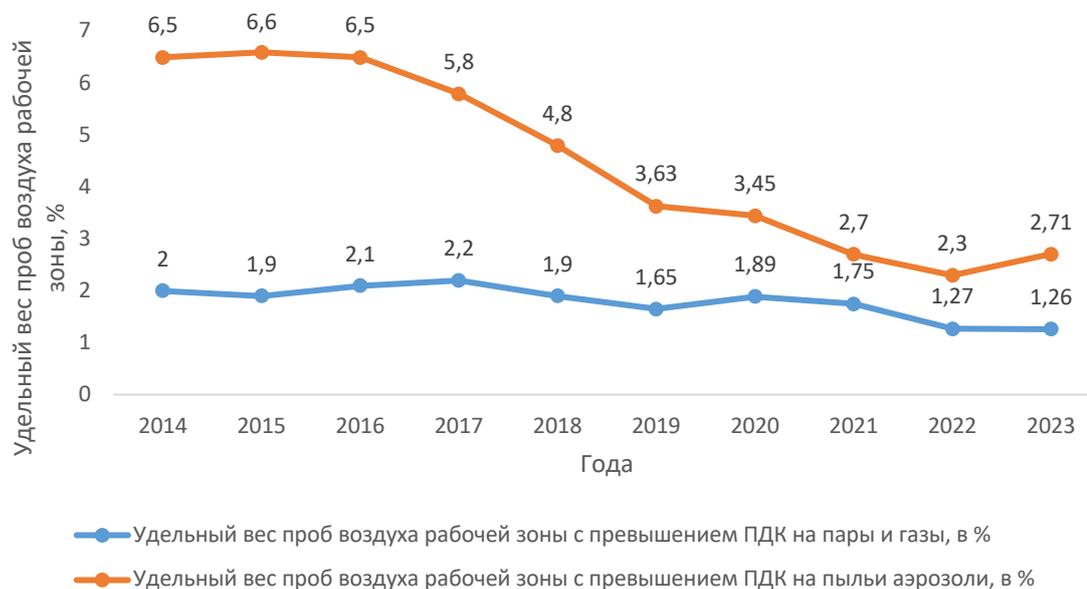


Рисунок 5 – Удельный вес проб воздуха рабочей зоны промышленных предприятий РФ с превышением ПДК на пары и газы, на пыль и аэрозоли за период 2014–2023 гг.[19]

Согласно данной статистике, несмотря на тенденцию к снижению до 2022 года, в 2023 году наблюдалось повышение удельных проб воздуха на

промышленных предприятиях, что способствует к увеличению вероятности возникновения профессиональных заболеваний работников.

1.2 Способы борьбы с пылью на территории горно-металлургических предприятий

Для снижения пылевой нагрузки на предприятиях были разработаны различные меры по локализации пыли или ее подавлению. Существующие на сегодняшний день способы по удалению или защите от пыли на горно-металлургических предприятиях приведены на рисунке 6 [20].

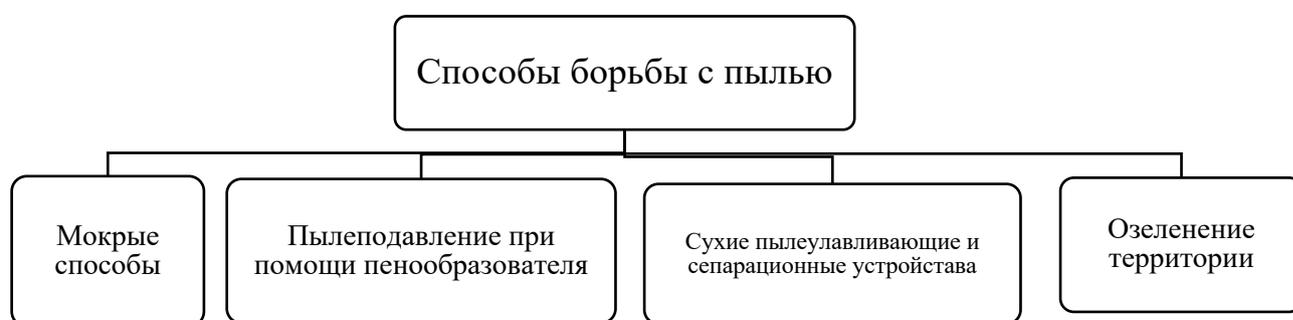


Рисунок 6 – Современные способы пылеподавления на горно-металлургических предприятиях [20]

1.2.1 Мокрые способы пылеподавления

К мокрым способам относят подавление пыли при помощи жидкостных составляющих для смачивания и последующей коагуляции воды с частичками пыли. Такие способы в основном применяются на первом этапе горно-металлургического производства, а именно на этапе добычи руды и полезных ископаемых. Жидкостные способы используются для предупреждения выброса пыли в воздух рабочей зоны при транспортировке, разгрузке и погрузке шихты. Существуют несколько способов использования жидкости:

- предварительное смачивание и орошение горной породы;
- орошение воздуха рабочей зоны, непосредственно перед проведением работ с шихтой;
- орошение пыли, осевшей после работы с шихтой [21, 133].

Мелкодисперсную вдыхаемую пыль, содержащуюся в воздухе, возможно эффективно осаждают посредством водяного тумана. Применение водяного тумана, формируемого с использованием специализированного оборудования различных конструктивных типов, представляет собой современный и динамично развивающийся метод пылеподавления. Использование туманообразующих установок целесообразно в тех случаях, когда дождевальные системы оказываются неэффективными либо технически неприменимыми, например, при необходимости формирования туманной завесы в зоне загрузочных бункеров или дробильных агрегатов для предотвращения распространения пыли в окружающую среду.

Стационарные и мобильные туманообразователи

Туманообразующее оборудование может устанавливаться на стационарных основаниях (рис. 7) или мобильных платформах — колесных тележках, кузовах грузовиков, поливальных машинах и стрелах телескопических погрузчиков — что обеспечивает его эффективное применение в различных зонах пылеобразования и повышает оперативность использования в производственных условиях.

Стационарные системы туманообразования применяются в зонах постоянного пылеобразования, например, при производстве строительных материалов, в местах разгрузки и транспортировки сыпучих веществ, а также вдоль лент конвейеров. Конструктивно такие системы включают насосные агрегаты высокого давления (до 120 бар), подающие воду в распыляющие форсунки гидравлического типа, в которых рабочее давление составляет порядка 10–20 бар. Перед подачей вода проходит многоступенчатую фильтрацию, что позволяет предотвратить засорение форсунок и обеспечить стабильную работу системы при длительной эксплуатации (рис. 8).

Ультразвуковые генераторы тумана, представляющие сравнительно новую технологию, подают под низким давлением (2–5 бар) воду и сжатый воздух (рис. 9) через форсунку, сконструированную по принципу свистка с резонаторной камерой, где образуются мощные ударные волны, веерообразно распыляющие воду со скоростью звука.



Рисунок 7 – Пример стационарной системы туманогенератора на горно-металлургическом производстве

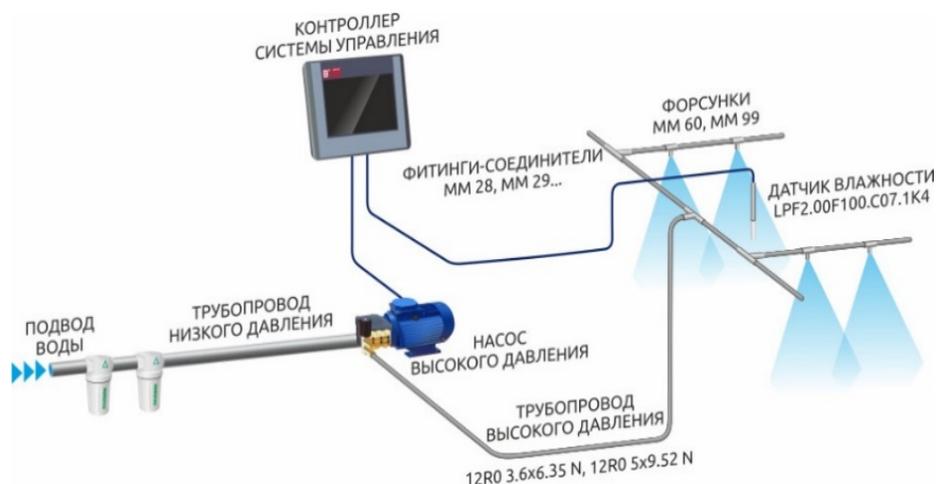


Рисунок 8 – Типовая схема построения системы туманообразования на предприятии

При подаче воды или другой жидкости в зону действия акустических или пневматических волн она диспергируется на мелкие капли диаметром 1–10 мкм, которые медленно удерживаются во взвешенном состоянии, эффективно связывая

пыль, при этом регулируемое давление воздуха позволяет управлять размером капель, снижая расход воды и предотвращая переувлажнение поверхностей и грунта [23]. При работе генератора тумана с пневматической форсункой возникает эффект, аналогичный электростатическому пылеуловителю: положительно заряженные капли тумана взаимодействуют с отрицательно заряженными пылевыми частицами, усиливая их коагуляцию и осаждение, что повышает эффективность пылеподавления и снижает расход воды.



а. - каналный ультразвуковой генератор тумана, б – генератор холодного тумана,
в – стационарный производственный генератор тумана

Рисунок 9 - Ультразвуковые генераторы тумана

Преимущества пневматической форсунки включают отсутствие подвижных элементов, подачу воды при низком давлении и увеличенное отверстие для снижения засоряемости, а дополнительный продувочный клапан уменьшает образование минеральных отложений, при этом установки отличаются невысокой стоимостью и высокой эффективностью пылеподавления, хотя требуют значительных объёмов сжатого воздуха [24]. В ряде производственных условий применение систем туманообразования в закрытых помещениях является более рациональным и экономически обоснованным по сравнению с традиционными вентиляционными установками, обеспечивая при этом энергозатраты лишь около

5 % и стоимость монтажа примерно 40 % от аналогичных показателей стандартных вентиляционных комплексов.

Пылеподавляющие пушки представляют собой мобильное оборудование для периодического функционирования, целесообразное в открытых пространствах для локализации пылевых выбросов и формирования аэрозольных барьеров, широко применяемое на строительных объектах, горнодобывающих карьерах и промышленных площадках для обеспечения экологической безопасности и поддержания нормативной запылённости воздуха. «Пушка» (рис. 10) представляет собой кожух с высокопроизводительным осевым вентилятором, окружённый кольцом распылительных форсунок, формирующих мелкодисперсное аэрозольное облако, которое транспортируется воздушным потоком, при этом кольцевой коллектор может состоять из регулируемых секций, что позволяет адаптировать форму факела тумана к технологическим требованиям. Конструктивно пушка пылеподавления может включать два-три кольцевых контура форсунок и сдвоенную крыльчатку вентилятора для увеличения расхода воздуха, обеспечивая дальность переноса аэрозольной струи 15–250 м, высоту факела 15–20 м, стационарное или вращающееся монтирование с углом наклона 0–50° и автоматическим поворотом до 360°, что позволяет формировать зону покрытия свыше 12 000 м² [25].

Рабочее давление туманогенерирующих пушек обычно составляет 10–20 бар, при этом решения с давлением до 70 бар позволяют устанавливать до ~156 форсунок вместо 30–60, повышая производительность и равномерность аэрозольного поля, а система может дополняться дозирующим насосом для ввода добавок, снижающих запах и межфазное натяжение для улучшения коагуляции пылевых частиц. Подбор характеристик тумана осуществляется изменением конструктивных и гидродинамических параметров форсунок — типоразмера, геометрии факела, пропускной способности и диаметра соплового отверстия — что позволяет адаптировать дисперсный состав капель к размерам пыли и условиям эксплуатации, а пространственное направление струи регулируется поворотными

шарнирами и изменением рабочего давления воды. Во избежание вариаций дисперсности капель форсунки в одной установке рекомендуется унифицировать по типоразмеру, при этом конструкция изготавливается из латуни или коррозионностойкой стали с быстросъёмным исполнением, что обеспечивает длительную эксплуатацию, минимальное обслуживание и устойчивость к абразивному износу и коррозии, включая работу с неочищенной водой [26].



Рисунок 10 – Пушка пылеподавления в рабочем состоянии на предприятии

Стационарные туманообразующие установки получают питание от трёхфазной сети или универсальных источников напряжения, а мобильные комплексы подключаются к сети или оснащаются дизель-генератором, при этом управление реализуется дистанционно через компьютер или пульт с регулировкой углов поворота, а система управления включает датчик давления, расходомер, счётчик моточасов и блок защитного отключения, при этом модульная конструкция позволяет адаптировать установки под конкретные условия эксплуатации. Все металлические элементы туманообразующих установок изготавливаются из коррозионностойких сплавов с долговечным порошковым покрытием, дисперсный состав капель регулируется в диапазоне 0,1–1000 мкм для

согласования с характеристиками пыли и дальностью переноса, а системы помимо пылеподавления используются для нейтрализации запахов, фитосанитарной обработки и дополнительного испарительного охлаждения воздуха [27]. Несмотря на высокую производительность, пылеподавляющие «пушки» требуют минимального обслуживания — ограниченного периодической смазкой подшипников вентилятора каждые 10 000 часов работы, при этом привод поворота дополнительного ухода не требует, уровень шума низкий, а для объектов с повышенными требованиями к безопасности предусмотрены взрывозащищённые версии и модели с пневматическим приводом.

К мокрым методам осаждения пыли относится обработка автомобильных дорог на горно-металлургических предприятиях, где 70–90 % [28] пыли образуется из-за движения транспорта; обычное гидроорошение эффективно лишь кратковременно, тогда как использование коагуляционного состава «Универсин» позволяет после равномерного распределения жидкости по дорожному полотну и подсушки (3 ч вне карьера, 30 мин внутри) с последующей подсыпкой щебня фракции 3–4 мм формировать прочную корку, снижающую повторный подъём пыли и увеличивающую интервал между обработками.

Пылеосаждение с применением технологии «Сухой туман»

С развитием технологий «сухой туман» стал эффективным и практичным методом пылеподавления, широко применяемым на горно-металлургических предприятиях при погрузке, разгрузке, дроблении, сортировке и транспортировке руды и породы, где он снижает вторичный подъём пыли и способствует поддержанию экологической безопасности [29, 30]. Ключевое преимущество технологии «сухого тумана» заключается в работе у источника пылеобразования: мелкодисперсные капли связывают частицы руды и отходов, ускоряют их осаждение, формируют защитную аэрозольную завесу, ограничивающую распространение пыли, снижают её повторный подъём колесной техникой, уменьшают нагрузку на оборудование, риски для здоровья персонала и негативное

воздействие на окружающую среду [31]. Технологию «сухого тумана» можно интегрировать в системы вентиляции и при транспортировке материалов, распыляя мелкодисперсный аэрозоль в воздуховодах, на участке фильтрации или вокруг конвейеров, где капли связывают пылевые частицы, ускоряют их оседание, создают защитную завесу, снижают вторичный подъём и ветровой вынос пыли, что улучшает качество воздуха, уменьшает износ оборудования, повышает безопасность труда и снижает экологические и эксплуатационные риски [32].

Внедрение технологии «сухого тумана» в горно-металлургическом комплексе снижает нагрузку на окружающую среду, улучшает условия труда, уменьшает вторичный подъём пыли и эксплуатационные риски, обеспечивая соблюдение экологических норм и формирование чистой и безопасной производственной среды, что делает её ключевым инструментом современного пылеподавления [33].

Технология «сухого тумана» реализует пылеподавление в несколько этапов: сначала жидкость диспергируется в мелкие капли (до 10 мкм) с помощью аэродинамических и акустических воздействий, формируя плотное облако, которое улавливает пылевые частицы у источника через электростатические взаимодействия, адгезию и коагуляцию; затем происходит коагуляция частиц с водными каплями, в ходе которой пар конденсируется на аэрозольных частицах, образуя крупные капли, ускоряющие оседание и формирующие «мелкий дождь», а пылевые частицы захватываются одновременно за счёт инерционных столкновений, перехвата, конденсационного прироста и броуновской диффузии, что приводит к объединению капель и частиц, ускоренному осаждению и устойчивому снижению концентрации аэрозоля в рабочем объёме, обеспечивая высокую эффективность технологии [34-35].

1.2.2 Пылеподавление при помощи пенообразователя

Использование пены для снижения запыленности является одним из наиболее эффективных методов в современной горнодобывающей

промышленности, демонстрируя до 95 % эффективности в шахтах за счёт высокой смачиваемости, низкого возобновления пыли и большой площади покрытия, что позволяет захватывать значительный объём разрушенной породы и положительно влияет на пылеосаждение и взрывобезопасность на агломерационных производствах и при производстве железорудного концентрата [36, 38]. Пенный метод пылеподавления, широко применявшийся в Европе и Северной Америке с 1950–1960-х годов и позднее внедрённый в России, продемонстрировал в шахтах технологические и экономические преимущества, увеличивая эффективность улавливания пыли в 2–2,5 раза по сравнению с традиционным орошением и снижая водопотребление в 2–3 раза, что делает его ресурсосберегающим и рациональным решением для горнодобывающих производств [23, 38]. При удельном расходе пенообразующего раствора 12–15 л/т остаточная запылённость в помещениях снижается до 11,2–14,4 мг/м³ (эффективность 99,6–99,7 %), однако в горно-металлургических производствах эффективность пенообразующих средств ограничена малым радиусом действия, что снижает улавливание пыли на открытых площадках, а химический состав пены может быть токсичным для персонала и вызывать коррозию металлических конструкций, повышая аварийность оборудования (рис. 11).

Пена, представляющая собой дисперсную систему газовых пузырьков, разделённых тонкими жидкими плёнками, благодаря высокой кратности вспенивания обеспечивает значительно большую поверхность контакта с пылевыми частицами, что обуславливает её высокую эффективность при изоляции очагов пылеобразования и снижении запылённости воздуха в производственных помещениях [39, 40, 41]. Применение пены и поверхностно-активных веществ в горно-металлургическом производстве при переработке железорудных концентратов ограничено вследствие высоких эксплуатационных затрат, обусловленных необходимостью значительных объёмов реагентов, негативного влияния остаточных ПАВ на физико-химические свойства концентрата и параметры последующих технологических операций, а также быстрой потери

устойчивости пены в условиях повышенных температур и интенсивного пылеобразования. Распыление воды в виде мелкодисперсного аэрозоля обеспечивает эффективное связывание и осаждение пылевых частиц без побочных химических и технологических последствий, отличаясь при этом экологической безопасностью, экономической целесообразностью и технологической совместимостью с процессами подготовки железорудного концентрата, что обуславливает его предпочтительность как метода пылеподавления в горно-металлургическом производстве.



Рисунок 11 – Пример функционирующего пеногенератора

1.2.3 Сухие пылеулавливающие и сепарационные устройства

Сухие пылеулавливающие устройства и сепараторы реализуют улавливание твёрдых частиц за счёт фундаментальных физических механизмов. Каждый класс аппаратов использует доминирующий процесс разделения фаз. Ниже приведены основные способы отделения аэрозольных частиц от газовой среды и типовые технические решения, а также их область применимости, ограничения и требования к эксплуатации [42]:

1. Гравитационное осаждение обеспечивает снижение концентрации крупной и средней фракции пыли за счёт выпадения частиц под действием силы тяжести при оптимизации гидродинамического режима и геометрии аппарата с учётом их физических параметров [43,44].

2. Инерционное осаждение основано на различии плотностей частиц и газовой среды, вследствие чего при изменении направления или скорости потока более инерционные частицы выходят из газовой струи и осаждаются на улавливающих поверхностях [45, 46].

3. Осаждение под действием центробежной силы, многократно превышающей силу тяжести в закрученных потоках, обеспечивает интенсивное перемещение частиц к периферии аппарата и их осаждение, что повышает эффективность улавливания по сравнению с гравитационным методом и позволяет извлекать более мелкие фракции пыли, как реализовано в циклонах и мультициклонах [47, 48].

4. Фильтрационное осаждение использует эффект зацепления частиц при фильтровании. При прохождении аэрозольного потока через волокнистые и пористые материалы частицы задерживаются в извилистых каналах и порах. Работают механизмы перехвата, импакции и диффузии, формируется осадочный слой, который дополнительно повышает степень очистки при условии корректной регенерации фильтрующей среды [49].

5. Осаждение частиц в электрическом поле электрофильтров осуществляется за счёт их зарядки в коронном разряде и последующего дрейфа к осадительным электродам противоположного знака с образованием пылевого слоя, периодически удаляемого вибрацией, что обеспечивает высокую эффективность очистки газов от мелкодисперсной фракции даже при значительных объёмах потока [50, 51].

Дополнительные физические и биотехнические методы (термо-, фотофорез, акустическое укрупнение, магнитное и биологическое воздействие) дополняют пылеулавливание и обеспечивают более точную настройку процесса под свойства аэрозоля и параметры потока. Для снижения концентраций пылей и туманов

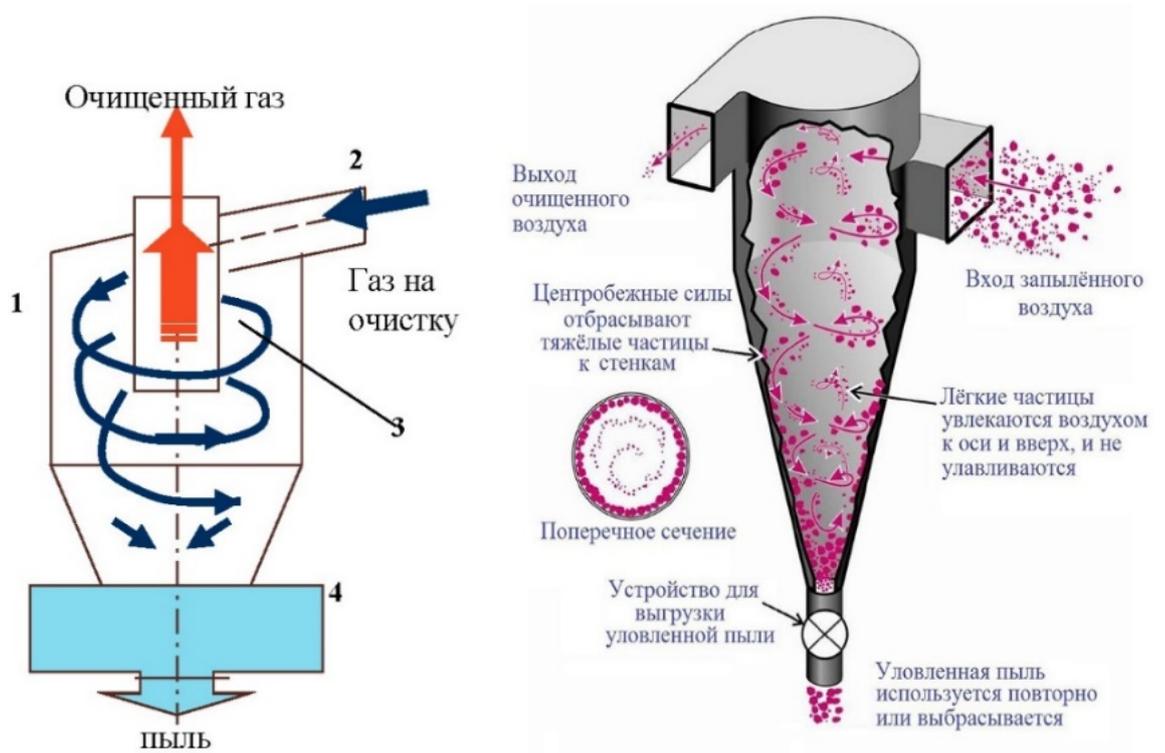
применяют три группы технологий: сухие (гравитационные, инерционные, центробежные и фильтрационные, эффективные при высоких температурах и для крупной/средней фракции, но требующие доочистки для тонкодисперсной), мокрые (контакт газа с жидкостью с переводом частиц в жидкую фазу и возможным охлаждением потока при необходимости последующей обработки шлама) и электрические (ионизация, зарядка и осаждение частиц на электродах, обеспечивающие высокую эффективность по мелкой фракции при больших расходах газа при стабильных режимах и регулярном удалении осадка) [52].

Пылеулавливающее оборудование в зависимости от используемого физического механизма может быть разделено на 4 типа:

1. Наиболее простыми и широко применяемыми средствами сухой очистки воздуха и газов от крупной неслипающейся пыли являются инерционно-центробежные аппараты [53, 54, 55, 56]. К этой группе относят три типовых решения.

а) Циклоны (рис. 12). Циклоны рационально использовать в качестве ступени предварительной очистки, устанавливая их перед рукавными фильтрами или электрофильтрами — это снижает нагрузку на тонкую очистку и стабилизирует режим по перепаду давления и запылённости.

б) Батарейные циклоны (рис. 13). При больших расходах воздуха батарейные циклоны обеспечивают высокую производительность, но из-за перетоков и неравномерного распределения потока их эффективность обычно на 20–25% ниже, чем у одиночных циклонов сопоставимого типоразмера, что требует корректной обвязки и регулярного контроля герметичности и баланса расходов [57, 58].



1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – сборник пыли

Рисунок 12 – Схема устройства и функционирования циклона с описанием

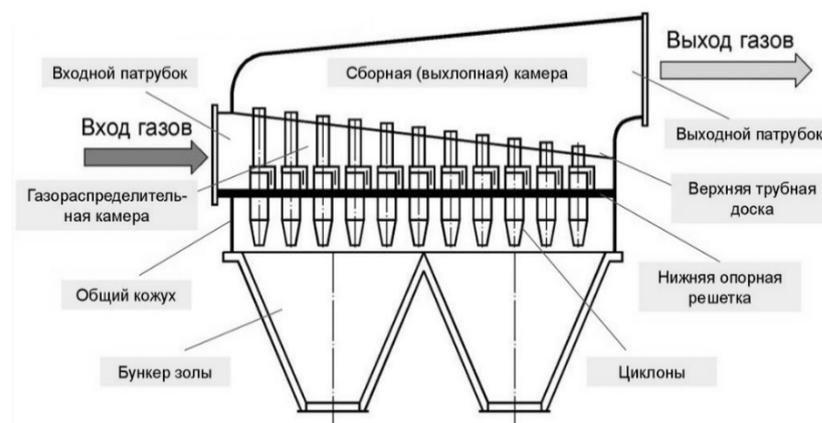


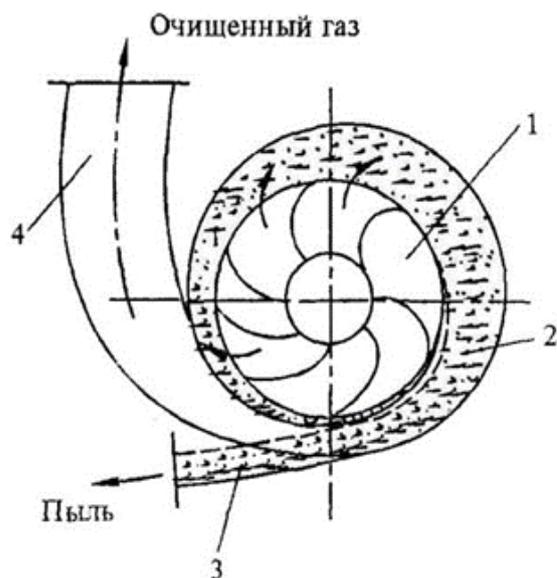
Рисунок 13 - Схема устройства батарейного циклона

в) Ротационные пылеуловители. Предназначены для улавливания частиц крупнее ≈ 5 мкм (центробежные аппараты). Вентилятор и пылеуловитель объединены в одном корпусе, что обеспечивает компактность и удобство модернизации, а при преобладании фракции 20–40 мкм достигается стабильно

высокая степень очистки с одновременной транспортировкой воздуха/газа (рис. 14) [59].

г) Жалюзийные пылеотделители. Жалюзийные аппараты за счёт инерционного разделения в решётке выделяют пыленасыщенную ветвь (направляемую в циклон для доочистки) и очищенную фракцию, возвращаемую в магистраль, что повышает суммарную эффективность улавливания и снижает нагрузку на последующие ступени очистки. [59, 60].

Жалюзийные пылеотделители, простые для интеграции в газоходы, обеспечивают устойчивое улавливание (примерно 0,8 для частиц >20 мкм) при очистке горячих дымовых газов до 450–600~°С, а рециркуляция пыленасыщенной ветви из циклона повышает общий коэффициент пылезадержания и снижает нагрузку на последующие ступени очистки. [61].



1- крыльчатое колесо; 2 – спиральный кожух; 3 – пылеприемное устройство; 4 – отводящий патрубок
Рисунок 14 – Устройство и принцип работы ротационного пылеуловителя

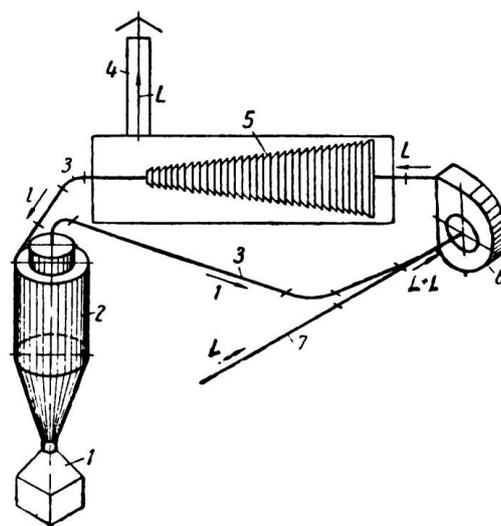


Рисунок 15 – Схема установки конического инерционного пылеотделителя с циклоном на линии нагнетания

1.2.4 Озеленение территории производства

Озеленение территории металлургического предприятия является одним из методов снижения пылевого загрязнения и основано на использовании древесных, кустарниковых и травянистых растений для улавливания пыли и фильтрации загрязняющих веществ из воздуха и поверхностных вод, а также для формирования защитных зелёных зон [62, 63]. Озеленение производственных территорий снижает пылевое загрязнение за счёт растительных барьеров, задерживающих пыль и уменьшающих скорость воздушных потоков (эффект максимален в тёплый период при развитой листве), при этом успешная реализация требует предварительной оценки состояния почв и подбора устойчивых к условиям металлургического производства видов [64]. При озеленении производственных территорий следует учитывать экологические ограничения на применение удобрений и пестицидов, поскольку растительность, помимо улавливания пыли и выделения кислорода, способствует увлажнению воздуха и формированию более благоприятного микроклимата, что может снижать температуру на площадке и риск возгорания. [65].

Озеленение производственной территории может снижать запылённость при условии регулярного ухода и контроля загрязнения воздуха, однако максимальная эффективность достигается лишь в комплексе с техническими мерами пылеулавливания и системами очистки, а также с постоянным мониторингом качества воздуха [66, 67]. Для металлургических предприятий пригодны не все виды растений из-за высоких температур и химических воздействий, поэтому при озеленении целесообразно отдавать предпочтение многолетним травам с развитой корневой системой, способным удерживать пыль, улучшать структуру даже обеднённых почв и обеспечивать рекультивацию, при этом выбор видов следует выполнять с учётом характеристик почвы, климата и пылеулавливающих свойств [68]. Озеленение техногенных площадок следует планировать с учётом воздействия на экосистему и социального эффекта, предварительно прекратив складирование отходов и при необходимости очистив территорию, при этом из-за существенных затрат на инфраструктуру и обслуживание его целесообразно

рассматривать как элемент комплексной программы снижения запылённости с обязательной оценкой эффективности совместно с другими мерами [69, 70, 71].

1.2.5 Перспектива применения пульсирующей вентиляции в локальных вытяжных системах для осаждения пыли

Системы местной вытяжной вентиляции работают по принципу улавливания загрязняющего вещества вблизи его источника. Современный подход к контролю загрязнения воздуха указывает на необходимость использования эффективных устройств очистки воздуха в системах промышленной вентиляции. Наименьший расход воздуха в системе местной вытяжки приводит к снижению затрат на устройства очистки воздуха. Местные вытяжные системы состоят из четырех основных элементов: вытяжного колпака, системы воздуховодов (включая вытяжную трубу и рециркуляционную трубу, воздуховод), устройство очистки воздуха и вытяжной вентилятор [72].

Цель вытяжной системы - собрать загрязняющее вещество, образующееся в потоке воздуха, направленном в сторону вытяжки [73]. Затем система воздуховодов должна транспортировать загрязненный воздух к устройству очистки. В фильтре загрязняющее вещество удаляется из воздушного потока, а вентилятор должен преодолеть все потери, связанные с трением, сечением воздуховода и дополнительными устройствами, включенными в данную систему (рис. 16).

Система вентиляции с применением вытяжных систем — это концепция, применяемая не только в качестве местной, но и в качестве общеобменной вентиляции, в зависимости от источника загрязнения. Конфигурация вытяжки, воздуховодов и систем очистки различна, важно различать методы улавливания пыли (вытяжка) и методы фильтрации воздуха. Данные методы обладают высокой эффективностью, но имеют потенциал к совершенствованию [73]. Для более мелкодисперсных пылей с дисперсностью частиц от 1 до 40 мкм, возможно

усовершенствование описанной выше системы (для повышения эффективности пылеосаждения) путем добавления системы жидкостного орошения и устройства пульсирующей вентиляции.

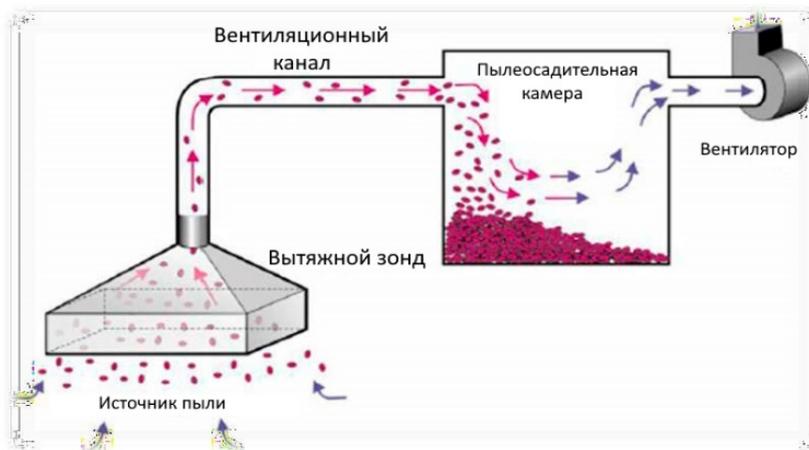


Рисунок 16 – Очистка от пыли в системе локальной вентиляции

Метод пульсирующей вентиляции может стать одним из эффективных способов осаждения пыли на производстве. Он основан на использовании системы подачи воздуха таким образом, при котором создаются пульсации воздуха, образуя волну высокого давления, которая перемещается вдоль створа пульсирующего устройства. Эта волна увеличивает турбулентность потока воздуха в пылеосадительной камере, повышая коагуляцию мелкодисперсных частиц (дисперсность ≈ 10 мкм) распыленной жидкости с частицами пыли, заставляя их сталкиваться чаще (частичка жидкости эффективнее обволакивает пылинку), что приводит к уменьшению времени осаждения пыли.

Очищенный увлажненный воздух, может подаваться на систему нагревательных тэнов для последующего осушения и грубой очистки на вторичных фильтрах. В фильтрах происходит осаждение пыли, которая может быть в последствии удалена, утилизирована или переработана для вторичного использования. Этот метод может применяться для осаждения различных видов

пыли, в том числе состоящей из токсичных и вредных веществ для здоровья человека.

Основным преимуществом метода пульсирующей вентиляции является повышение турбулентности воздуха в системе вентиляции, что может положительно сказаться на эффективности пылеосаждения особенно на производствах, где ее концентрация превышает нормативные значения. Также метод не требует больших затрат на оборудование и может быть легко встроено в уже существующую систему вентиляции.

1.2.6 Перспектива применения пульсирующей вентиляции при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата

В процессе разгрузки продуктов железорудного концентрата обычно образуется значительное количество пыли (средняя производительность в таких процессах достигает значений в 1000 т/ч), содержащей мелкодисперсные частицы [74, 75, 76, 77]. Такая пыль приводит к засорению подвижных частей (шестеренки, валы, детали крепления и т.д.) ленты, ее износу и дальнейшей поломке, что может привести к аварийным ситуациям, простоею оборудования и повышенным затратам на ремонт и замену ленты. Согласно данным, опубликованным в исследовании "Безопасность конвейеров" компанией MSHA (Mine Safety and Health Administration), наиболее распространенными причинами аварий на конвейерах являются:

- сбои в электрической системе (23,5% случаев)
- нарушение правил безопасности (22,6% случаев)
- проблемы с компонентами конвейерной системы (21,7% случаев)
- сбои в системах управления (17,3% случаев)
- проблемы с оборудованием для очистки (7,2% случаев)
- проблемы с приводами (5,5% случаев)
- другие причины (2,2% случаев)

Согласно приведённой статистике аварийности компоненты конвейерной системы, оборудование для очистки и приводы конвейерной системы (в сумме на данные причины приходится 34,4% случаев) могут быть подвержены излишнему износу, из-за мелкодисперсной пыли, выделяющейся при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата, при котором велик риск возникновения аварийной ситуации. Для осаждения данной пыли применяют орошение мелкодисперсным жидкостным аэрозолем с использованием ограждающих конструкций (полосы из полимеров). Для снижения аварийности, снижению безвозвратных потерь материала и повышению надежности применяют систему орошения (рис. 17) [78].

На рисунке 15 показано использование распыления воды для предотвращения попадания пыли в воздух и улавливания пыли в месте выгрузки материала. В этом процессе, в верхней части укрытия пыль взмывает и продолжительное время находится в витающем состоянии. Для осаждения пыли устанавливаются форсунки орошения. Такие форсунки создают мелкодисперсные капли воды, движущиеся навстречу источнику пылевыведения. Нижняя часть укрытия оборудуется форсунками, предотвращающими попадание пыли в воздух. Такая система распыления воды помогает улавливать пыль и осажать ее на поверхность бункера, предотвращая ее распространение в воздухе, обеспечивая более чистую и безопасную среду [78].

Для эффективного улавливания пылевых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в воздухе, необходимо, чтобы размер капель орошающего тумана был сопоставим с размером самих пылинок (рис. 17). Такое соотношение обеспечивает максимальную вероятность их взаимного столкновения и последующей коагуляции с образованием укрупнённых систем, способных оседать под действием силы тяжести. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наилучшие условия для связывания пылевых частиц достигаются при размере водяных капель в диапазоне от 10 до 150 мкм, что соответствует области

оптимального аэродинамического взаимодействия между пылевыми и водяными аэрозолями.

Применение пульсирующей вентиляции в данном случае может увеличить эффективность системы орошения, поскольку она создает короткие импульсы воздушного потока, способные облегчить коагуляцию частиц с жидкостью и последующее их осаждение на поверхность приемного бункера. Частицы аэрозоля, собираясь на поверхности бункера, укрупняются и сыпаются на конвейерную ленту, реже попадая в воздух и на подвижные детали (валы, шестерни, детали крепления и т.д.) конвейерной ленты. Использование метода пульсирующей вентиляции позволит уменьшить накопление пыли на подвижных деталях ленты, снизит вероятность их засорения и износа, что приведет к снижению аварийности конвейерных лент, уменьшению времени простоя и экономии на ремонтных работах

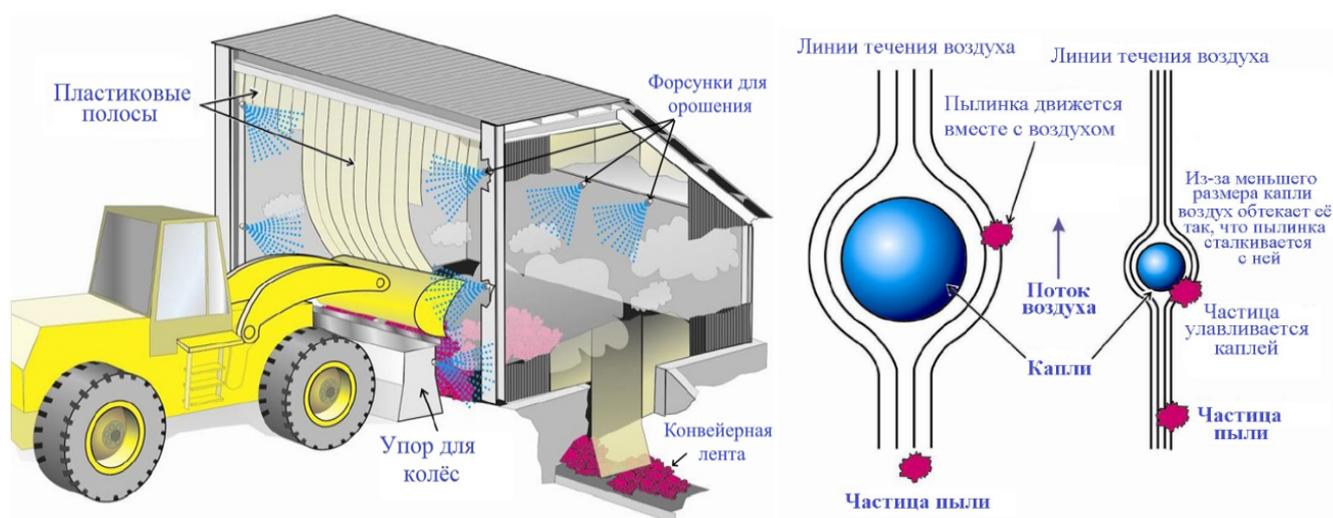


Рисунок 17 - Схема процесса снижения концентрации пыли с помощью ограждающих конструкций (пластиковые полосы) и применения метода жидкостного орошения в месте разгрузки продуктов подготовки железорудного концентрата

Основываясь на исследованиях К. З. Ушакова и В. Д. Косарева [75], в процессе повышения эффективности коагуляции при воздействии на аэрозоль

импульсами давления (Δp), генерируемыми пульсатором, происходит рост интенсивности турбулентности и увеличение коэффициента турбулентной диффузии, что приводит к интенсификации массопереноса и росту вероятности столкновения частиц. Импульсы давления, формируемые разницей скоростей (Δv) (в отличие от стационарного потока воздуха, в котором частицы движутся равномерно), заставляют частицы пыли и жидкости двигаться с постоянным ускорением, формируя вихревые движения, приводящие к вращению комплекса частиц относительно их центра масс. Это вращение увеличивает частоту столкновений частиц (интенсивность коагуляции повышается), способствует равномерному распределению жидкой фазы по поверхности частиц и обеспечивает устойчивость формирующейся структуры «пыль – вода». Так же К. З. Ушаковым и В. Д. Косаревым, а впоследствии и А. Э. Филиным было сформировано следующее определение исследуемому процессу:

Метод пульсирующей вентиляции основан на создании во времени периодически повторяющихся импульсов давления воздушного потока с заданной частотой, что приводит к формированию нестационарного (квазистационарного) турбулентного режима движения воздуха в канале (или выработке).

Оптимальные частоты пульсаций обеспечивают максимальное перемешивание среды, способствуя ускорению коагуляции и образованию более крупных структур. При этом импульсы давления создают чередование зон сжатия и разрежения (область высокого давления спереди, а область низкого позади), что дополнительно усиливает слипание частиц за счёт капиллярных и когезионных взаимодействий. Метод пульсирующей вентиляции применяется в средах с минимальными скоростями движения воздуха. Расход воздуха, подаваемый на пульсирующее устройство, должен находиться в диапазоне малых значений.

Данный механизм согласуется с результатами, представленными Сароновым И. А., Магомедовым Г. О., Ряжских В. И. и Шаховым С. В. [79], где показано, что процесс агломерации в жидкостно-капельных системах описывается, как

последовательность кинетических стадий взаимодействия твёрдых и жидких фракций. На рисунке 18 представлена теоретическая схема, иллюстрирующая процесс коагуляции частиц пыли с каплями воды при использовании орошения. Повышение вероятности столкновений частиц при пульсирующем воздействии способствует увеличению кинетического коэффициента агломерации относительно коэффициента образования плёнки, что обеспечивает рост выхода укрупнённых структур и формирование устойчивых агломератов. Таким образом, совместное действие капиллярных сил и импульсных аэродинамических флуктуаций создаёт условия для более интенсивной коагуляции аэрозольных частиц и повышения эффективности пылеулавливания в пульсирующих системах вентиляции.

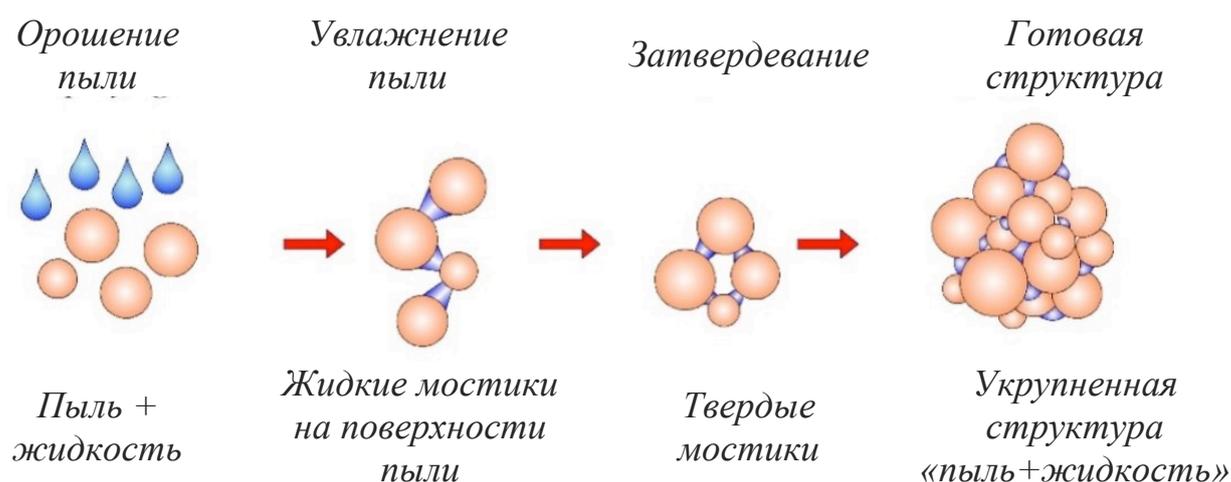


Рисунок 18 – Описание процесса коагуляции частицы пыли с каплями воды при орошении

Таким образом, согласно вышеописанному, дополнительное применение к традиционному орошению метода пульсирующей вентиляции заключается в воздействии на аэрозольный поток последовательными импульсами давления заданной частоты, что повышает интенсивность турбулентных пульсаций и

способствует увеличению вероятности коагуляции и осаждения аэрозольных частиц.

При анализе предшествующих исследований аэрозолей были рассмотрены ключевые труды ученых, внёсших фундаментальный вклад в механику аэрозолей, понимание процессов коагуляции и седиментации, а также распространения пылевых частиц в газовых потоках. В частности, важны работы Н.А. Фукса, сформулировавшего классическую теоретическую базу механики аэрозолей. Он систематизировал физические механизмы образования, коагуляции и осаждения частиц, а также представил математические модели транспорта аэрозолей в стационарных и простых нестационарных полях. Его монография «Механика аэрозолей» и связанные обзорные работы до сих пор используются как методологический фундамент при моделировании кинетики дисперсных систем и расчётах осаждения крупных и тонкодисперсных фракций [80].

А. С. Бурчаков одним из первых систематизировал закономерности образования и поведения аэрозольных систем в неустойчивых воздушных потоках, описал влияние турбулентности на распределение частиц по размерам и предложил математическое описание для расчёта их осаждения в шахтных выработках. В. Н. Воронин развил идеи аэродинамического взаимодействия частиц с потоком газа и определил критические скорости, при которых наблюдается переход от седиментации к уносу, что стало важным для расчётов вентиляционных систем [81, 82].

По вопросам вентиляции и пылеосаждения наиболее авторитетны труды академика А.А. Скочинского. Его фундаментальный учебник и монография «Рудничная вентиляция» служат классическим источником по аэрологии шахт, аэродинамическим сопротивлениям выработок, методам проектирования воздухообмена и связям между вентиляцией и запылённостью атмосферы выработок [83].

В области пылеподавления можно выделить работы, в которых изучаются водяные, пенообразующие и другие методы улавливания пыли. Значительный

вклад в развитие этого направления внесли исследования А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанова, А. И. Ксенофоновой, в трудах которых рассматривались инженерные решения по снижению запылённости воздуха в горных выработках и производственных помещениях. Особое внимание уделялось использованию водяных и пенообразующих систем орошения, оптимизации параметров распыления и подбору форсунок в зависимости от гранулометрического состава пыли и характеристик воздушного потока [84, 85, 86].

В трудах А. А. Скочинского и его последователей — Н. О. Калединой, М. А. Патрушева, О. В. Скопинцевой [87, 88, 89, 90, 91] — рассмотрены системы рудничной вентиляции и аэрологии. В «Руководстве по борьбе с пылью в угольных шахтах» и последующих работах под его редакцией подробно описаны практические способы увлажнения и водяного орошения в забойных участках, на конвейерах и в местах перегрузки материала [92]. Эти исследования стали основой нормативных подходов к проектированию пылеподавляющих установок и систем [93, 94, 95].

Что касается исследований воздействия пульсирующей вентиляции на массоперенос метана, наиболее заметны работы К.З. Ушакова и В.Д. Косарева, А.Э. Филина, а также А.С. Кобылкина. В их трудах анализируется механизм разрушения скоплений газа под воздействием нестационарных потоков воздуха. Также в диссертационных материалах А.С. Кобылкина рассматриваются особенности применения пульсирующей вентиляции в шахтных условиях [75, 96, 97].

Изучение процессов пылеобразования и закономерностей пылеосаждения на предприятиях горно-металлургического производства формировало основные представления о механизмах выделения пыли при дроблении, грохочении, пересыпке и транспортировке сыпучих материалов. Значительный вклад в изучение этих процессов внесли И. Н. Логачёв, установивший зависимость интенсивности пылевых выбросов от конструктивных особенностей перегрузочных узлов и скорости движения материала, а также Ю. М. Гилева,

исследовавшая формирование аэрозольных облаков при механическом разрушении и перемещении рудных масс [98, 99, 100, 101, 102].

В дальнейшем внимание исследователей сместилось в сторону оценки состава и дисперсности пылевых частиц, возникающих на этапах подготовки рудного сырья к плавке. В этих работах рассматривались физико-химические механизмы генерации пыли при ударах и трении частиц, а также влияние влажности и гранулометрического состава на интенсивность запыления. Свой вклад в разработку данной тематики внесли Л. К. Саплинов, изучавший пылевыделение при загрузке и разгрузке шихтовых материалов, и С.В. Энтин, занимавшийся вопросами аэродинамики пылегазовых потоков и повышением эффективности пылеуловителей в производстве конструкционных огнеупорных материалов [103,104]. Особое внимание уделялось вопросам аспирации и улавливания пыли. Здесь выделяются работы С. Л. Ровина, направленные на исследование образования и утилизации аспирационной пыли сталеплавильных печей [105, 106].

Совокупность этих исследований позволила определить физические закономерности пылеобразования при разгрузке железорудных концентратов и выявить ключевые параметры, влияющие на интенсивность выделения частиц — скорость разгрузки, влажность материала, высоту падения и конфигурацию приёмных устройств. Вместе с тем в указанных трудах не рассматривалось воздействие пульсирующих потоков воздуха (периодически повторяющихся импульсов давления воздушного потока с заданной частотой) и комбинированных методов пылеподавления, что сохраняет актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Выводы по главе 1

Таким образом, применение метода пульсирующей вентиляции при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата может быть эффективным средством для снижения аварийности оборудования (механизмов

конвейерных лент, приводов, смазочных узлов и тд.) на горно-металлургическом предприятии. Это поможет повысить надежность и производительность оборудования, сократить затраты на ремонт и обеспечить более безопасные условия работы. Применение метода пульсирующей вентиляции при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата будет способствовать повышению надежности оборудования и снизит невозвратные потери материала (потенциально переходящего в пыль) горно-металлургического предприятия.

Для обоснования оптимальных параметров и эффективности применения пульсирующей вентиляции при пылеосаждении орошением были поставлены следующие задачи:

1. Проведение физического моделирования процесса пылеосаждения, пылеосаждения орошением и комбинированного метода пылеосаждения (пылеосаждение орошением с применением метода пульсирующей вентиляции);
2. Разработка математической модели массопереноса в условиях пылеосаждения орошением и пульсирующей вентиляции;
3. Обоснование оптимальных параметров орошения и пульсирующей вентиляции для повышения эффективности коагуляции частиц аэрозоля, для ускорения осаждения коагулированных частиц пыли и повышения уровня безопасности по пылевому фактору.

2. Исследование процесса массопереноса в условиях повышенной запыленности участка ПШЖК агломерационного производства горно-металлургического предприятия в лабораторных условиях

2.1 Разработка методики эксперимента

Ввиду того, что задачи исследования подразумевают использование способа осаждения пыли с применением метода пульсирующей вентиляции, в настоящее время не применяющегося для снижения концентрации пыли продуктов подготовки железорудного концентрата в воздухе рабочей зоны, требуется наличие аналитических (расчетных) данных и практических (экспериментальных) наработок. Для проведения эксперимента по осаждению пыли продуктов подготовки железорудного концентрата требовалось разработать методику и программу проведения экспериментов, согласно которой будут получены необходимые эмпирические данные, согласующиеся с предыдущими исследованиями [107, 108].

Поскольку в работе применяются не только технологии, связанные с пылеосаждением, но и технологии, которые никогда не применялись для борьбы с пылью, эмпирические исследования будут разделены на этапы.

1. Моделирование запыленности в лабораторной установке максимальной возможной концентрации пыли (исходя из количества исследуемой пыли и разрешающей способности прибора измерения) в аэрозоле воздуха. На данном этапе проводились эксперименты по распылению пыли в объеме лабораторного бокса и осуществлялись замеры времени осаждения без применения осаждающих методов. Скорость движения воздуха в лабораторной установке – не более 4 м/с, влажность воздуха в начале эксперимента – 25-30 %, температура воздуха внутри лабораторной установки – 20-25 °С, объем воздуха внутри установки – 1 м³, а дисперсность пыли – 1-40 мкм. Измерения концентрации исследуемой пыли с фиксированием времени ее осаждения проводились по всей

поверхности лабораторного стенда (в 9 точках) и определялась точка, где время осаждения будет максимальное. На данном этапе проводится 90 экспериментов.

2. Определив значения времени самоосаждения пыли и точку измерения, проводится эксперимент по осаждению аэрозоля. Навески пыли распределяются по объему лабораторного бокса, а из пневматических форсунок, имеющих факел с полным конусом, с диаметром сопел 10, 15 и 20 мкм, осуществляют распыление аэрозоля под давлением 5,4 МПа (мощность насоса 750 Вт). На данном этапе проводится 30 экспериментов (10 экспериментов - с форсункой на 10 мкм, 10 экспериментов – с форсункой на 15 мкм и 10 экспериментов - с форсункой на 20 мкм).

3. Далее к сложившейся экспериментальной базе подключается пульсирующая вентиляция. На распределенную по боксу навеску пыли, под воздействием орошения (с форсунками 10, 15 и 20 мкм), накладывается воздействие пульсирующей вентиляции (расход воздуха 104 м³/ч, частота пульсатора 1, 3, 7, 10, 13, 20 Гц). Основной задачей данной части эксперимента является подбор такой частоты вращения лопастей пульсатора, при которой пыль смогла бы более эффективно коагулироваться с частичками жидкости и осаждаться на дне лабораторного бокса. Исходя из проведения экспериментов согласно описанным выше этапам была сформирована методика проведения экспериментов, представленная на рисунке 19.

4. Проведение дополнительных экспериментов по изменению расхода воздуха (50, 70, 90 м³/ч) и положению пульсирующего устройства (параллельно воздушному потоку и вертикально) в лабораторном стенде.

Разработанная методика проведения экспериментов по осаждению пыли ППЖК позволяет оценить эффективность различных способов пылеосаждения в лабораторных условиях. Включение этапов отбора, измельчения и просеивания пыли обеспечивает воспроизводимость экспериментов и стабильность исходных условий. Применение генератора воздушного потока для распределения пыли

внутри лабораторного бокса позволяет моделировать процессы массопереноса аэрозоля, характерные для производственных условий.

Система замеров концентрации пыли в девяти точках лабораторного бокса обеспечивает достоверную пространственную оценку распределения аэрозольных частиц, что важно для определения зон наибольшего осаждения пыли. Экспериментальная часть методики включает исследования осаждения пыли двумя основными способами: орошением с использованием форсунок различного диаметра (10, 15 и 20 мкм) и комбинированным методом, включающим пульсирующую вентиляцию, а также процесс самостоятельного осаждения пыли (без применения какого-либо дополнительного воздействия). Такой подход позволяет оценить влияние, как капельных характеристик аэрозоля, так и динамических факторов воздушного потока на процесс осаждения.

Выбор параметров пульсирующей вентиляции основан на определении их оптимальных значений, обеспечивающих максимальную эффективность осаждения пыли. Это дает возможность выявить наиболее оптимальные режимы комбинированного применения вентиляции и орошения для эффективного обеспыливания и осаждения. Обработка экспериментальных данных включает построение графиков и сравнительный анализ полученных результатов, что позволяет определить закономерности процесса осаждения пыли и выявить наиболее эффективные способы её удаления из воздушной среды (осаждения из воздуха производственных зон на их поверхность).

Методика включает меры по устранению остаточной пыли после каждого эксперимента посредством влажной уборки, что предотвращает влияние загрязнений на последующие эксперименты и повышает точность измерений. В целом, предложенная методика отличается системным подходом, позволяющим объективно оценить эффективность различных методов осаждения пыли, и может быть использована для разработки технологических решений по снижению запыленности воздуха на промышленных предприятиях.

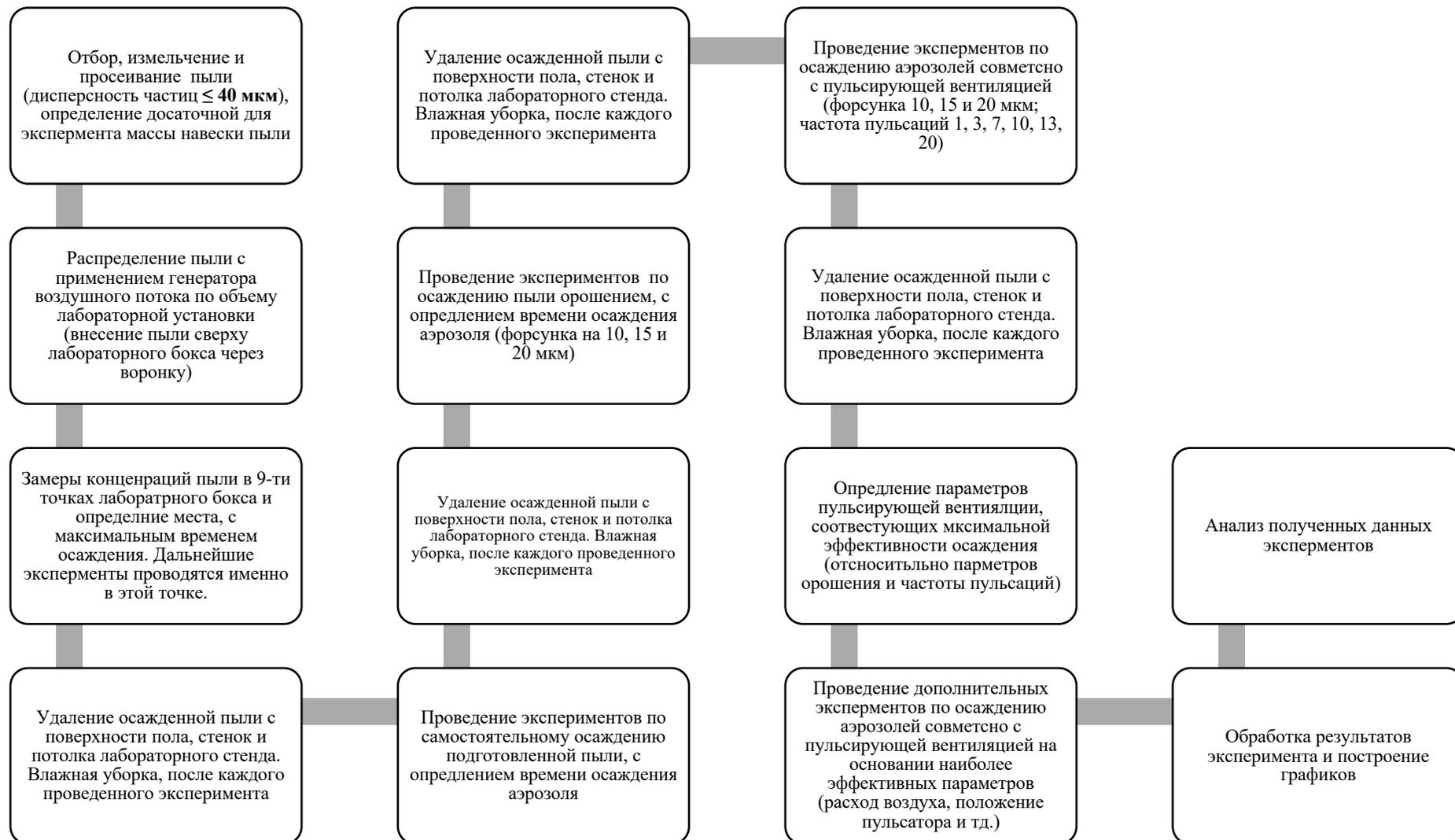


Рисунок 19 – Методика проведения эксперимента по пылеосаждению

2.2 Подготовка навесок пыли железной агломерационной руды участка ППЖК

2.2.1 Рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализ исследуемой пыли

При подготовке пыли к измельчанию требовалось убедиться в ее неспособности к самовоспламенению, в качестве соблюдения мер пожарной безопасности. Для этого требовалось провести рентгенофазовый анализ [109, 110] и определить элементный состав пыли (рентгенофлуоресцентный анализ). Рентгенофазовый анализ представлен в приложении 1.

Исходя из элементного состава пыли, можно сделать вывод, что пыль не способна к самовоспламенению и ее измельчение и просеивание не приведёт к возникновению возгорания, взрыву и выводу из строя оборудования для измельчения (рис. 20) [134, 112]. В таблице 3 представлены результаты элементного анализа пыли, образующейся в процессе подготовки продуктов железорудного концентрата. Основными компонентами пыли являются железо (Fe) с содержанием 68,98%, кремний (Si) — 9,54%, кальций (Ca) — 8,57% и магний (Mg) — 5,75%. Эти элементы составляют основную массу пыли, что объясняется их высоким содержанием в железорудном концентрате [120].



Рисунок 20 – Шаровая вибрационная мельница

Также в исследуемой пыли присутствует алюминий (Al) с содержанием 4,83%, сера (S) — 0,85%, марганец (Mn) — 0,65%, титан (Ti) – 0,5% и калий (K) — 0,11%. Эти элементы присутствуют в меньших количествах, но все же играют важную роль в химическом составе пыли, влияя на её физико-химические свойства и поведение при осаждении и улавливании. Такие элементы, как цинк (Zn), медь (Cu), фосфор (P), натрий (Na) и никель (Ni), имеют содержание менее 0,1%. Некоторые элементы, например стронций (Sr), цирконий (Zr), хром (Cr), рубидий (Rb), барий (Ba), йод (I) и другие, присутствуют в следовых количествах, что может быть связано с их редким присутствием в исходном материале или процессах переработки.

Таблица 3 – Результаты элементного анализа исследуемой пыли

Химический элемент	Процентное содержание, %	Химический элемент	Процентное содержание, %	Химический элемент	Процентное содержание, %
Si	9,54	S	0,85	Ba	-
Cl	-	Mn	0,65	Nb	-
Al	4,83	Zr	0,01	Cr	0,03
Fe	68,98	Sr	0,02	Ni	-
K	0,11	Cu	0,03	Y	-
Na	0,03	Rb	-	Pb	-
Ca	8,57	Zn	0,07	Br	-
Ti	0,5	Sn	-	I	-
Mg	5,75	P	0,03		

Согласно представленным результатам элементного анализа, исследуемая пыль может быть отнесена к типичной пыли, формирующейся на стадии подготовки продуктов железорудного концентрата. Полученные данные согласуются с требованиями и справочными характеристиками, приведёнными в стандарте ПАО «Северсталь» «Руда железная агломерационная. Общие технические условия» (СТО 28584391-0002-2019). Сходство исследуемой пыли со стандартом подтверждает, что её происхождение обусловлено преимущественно переработкой железорудного сырья и сопутствующими операциями (дробление,

сортировка, транспортирование, перегрузка), при которых происходит механическое истирание и образование мелкодисперсной фракции. Таким образом, результаты элементного анализа позволяют использовать исследуемую пыль для оценки пылевыведения и санитарно-гигиенических рисков, выбора мер по снижению запылённости и сопоставления с нормативными требованиями агломерационного производства.

2.2.2 Измельчение и просеивание исследуемой пыли

Подготовленная пыль, массой 500 г. направляется на измельчение и просеивание. Измельчение проводилось при помощи шаровой мельницы, представленной на рисунке 21. В барабанных шаровых мельницах пыль измельчается внутри вращающегося барабана. При вращении мелющие тела и загрузка движутся по круговой траектории, а затем падают по параболе. Часть загрузки скатывается вниз по подстилающим слоям. Материал измельчается в результате истирания при перемещении мелющих тел и частиц материала, а также удара [113].

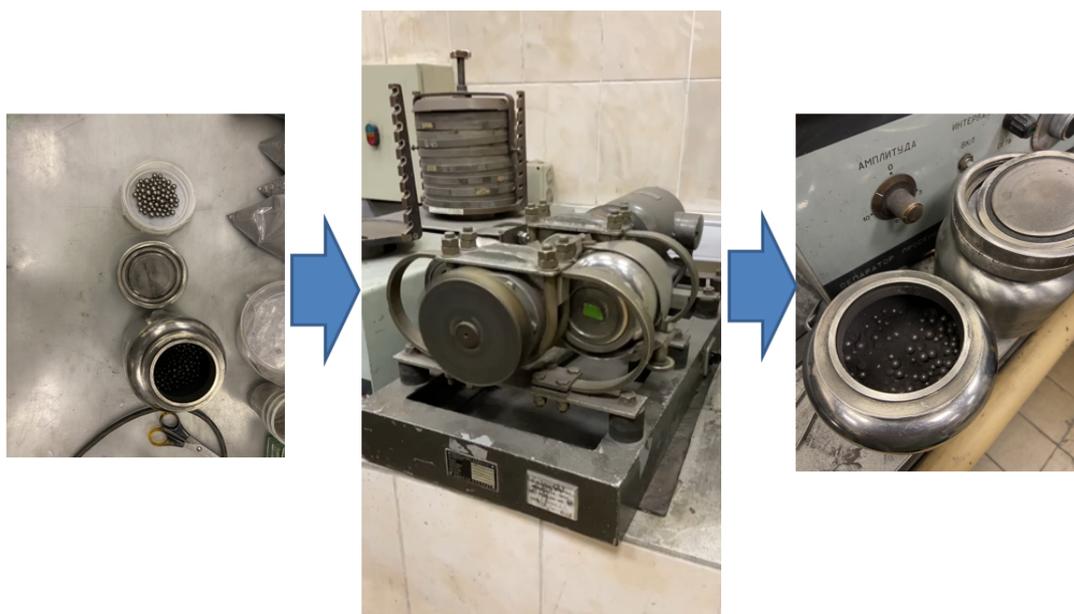


Рисунок 21 – Проведение измельчения пыли

Представленная на рисунке барабанная шаровая мельница содержит 2 барабана, в которые засыпается одинаковое по массе количество стальных шариков разного диаметра (до 10 мм). Масса барабанов с засыпанными в них шарами и навесками пыли (150 г. в каждом барабане) также была одинаковой и составляла 3173 г. Измельчение пыли приводится в течении 15 мин. После каждого измельчения пыль высыпалась вместе с шарами (стальной барабан обстукивают резиновой киянкой по поверхности стенок и дна, чтобы пыль гарантированно высыпалась из него) на крупное сито и просеивалась вручную. Стальные шары, оставшиеся в сите, тщательно протираются бумажным полотенцем и подготавливаются к следующей загрузке [114].

На выходе после измельчения в шаровой мельнице полученный материал необходимо подвергнуть термической обработке, чтобы убрать максимальное количество влаги. Измельчённую пробу пыли помещают в керамическую чашу и отправляют в муфельную печь, нагретую до 120 °С (рис. 22). В данной печи в течении 30 мин влага испаряется и остаётся полностью обезвоженный материал, готовый для просеивания.



Рисунок 22 – Муфельная печь для прогрева измельченной пыли



Рисунок 23 – Просеивание нагретой пыли на вибрационном сепараторе

После нагрева навеску пыли достают из печи и сразу же направляют на вибрационную просеивающую установку для того, чтобы пыль не напиталась влагой и не окомковывалась. Если же навеску пыли охладить при естественных условиях, пыль набирает влагу из помещения и с наименьшей эффективностью подвергается просеиванию. Вибрационная просеивающая установка, на которой проводилось просеивание пыли, приведена на рисунке 23 [115].

2.2.3 Гранулометрический анализ пыли железорудного концентрата

Поскольку наибольший интерес для исследования представляет пыль дисперсностью от 1 до 10 мкм, требовалось убедиться в ее наличии и процентном соотношении, в подготовленной после измельчения и просеивания пыли. Для этого был проведен гранулометрический анализ [116].

Для определения гранулометрического состава пыли использовался метод дифракции лазерного луча с применением лазерного анализатора "ANALYSETTE 22 MicroTec plus" (Dr. Fritsch, Германия) [117]. Методика определения размера частиц не отличается сложным принципом работы. При частичном отклонении лазерного луча за образцом образуется характерное кольцеобразное распределение

интенсивности, которое измеряется детектором. Размер частиц вычисляется на основе расстояния между этими кольцами: крупные частицы образуют близко расположенные кольца, в то время как мелкие частицы создают более удаленные друг от друга кольца.

Настройка положения обоих лазеров осуществляется быстро, независимо и в автоматическом режиме. Благодаря специальной траектории длинноволнового инфракрасного лазерного луча внутри компактного измерительного блока прибор обеспечивает высокую точность измерения, даже для крупных частиц. При переключении на измерение мелких частиц с использованием коротковолнового зеленого лазерного луча, детектор и сам лазер смещаются относительно неподвижной измерительной ячейки. Данный анализатор осуществляет определение гранулометрического состава в соответствии с международным стандартом ISO 13320:2020 [118].

Всего было проведено 5 анализов. Результаты проведенных анализов обработаны и представлены в таблице 6. Зависимости, полученные при проведении гранулометрического анализа, представлены в приложении 2.

Согласно гранулометрическому анализу, приведённому в таблице 4 (в таблице приведено процентное соотношение в формате накопления), процентное соотношение частичек пыли продуктов подготовки железорудного концентрата размером 1-5 мкм составляет около 5 % от массы пробы, частицы размером 5-10 мкм составляют порядка 15% от массы пробы, частицы размером 10-20 мкм составляют около 30% от массы пробы, частицы размером 20-30 мкм составляют порядка 25% и частицы размером 30-50 мкм составляют порядка 20% от массы анализируемой пробы (5 г.). Поскольку разрешающая способность прибора составляет 1-10 мкм и получить частицы такого размера в 1 г. пробы для проведения эксперимента по осаждению не удалось, требуется прибегнуть к увеличению массы навески, используемой в эксперименте пыли, до такого значения, в котором количество частичек ≤ 10 мкм будет максимальным [119]. Так же при проведении линейной интерполяции данных, приведённого выше анализа, частицы с дисперсностью, равной 10 мкм, составляют не более 18%.

Таблица 4 – Процентное соотношение дисперсности частиц в 1 г измельченной пыли железорудного концентрата

%	Порядковый номер измерения					Дисперсность средняя, мкм
	1	2	3	4	5	
5	2,3	2,5	2,4	2,5	2,5	2,44
10	5,7	6,6	6,2	7,1	6,2	6,36
25	12,3	12,7	13,1	13,3	13,2	12,92
50	19,2	19,4	18,6	18,8	18,3	18,86
75	27,4	27,6	24,8	24,9	24	25,74
90	36,2	36,4	31,2	31,2	29,9	32,98
95	41,7	41,8	35,3	35,4	33,5	37,54
99	53,3	53,3	43	43	40,3	46,58

2.3 Определение массы навески пыли, используемой в экспериментах по осаждению

Подбор требуемой массы пыли осуществляли экспериментальным методом, путем введения навески пыли начальной массы (0,01 г) в лабораторный бокс и фиксирование значения концентрации на приборе. После проведения эксперимента с данной навеской фактическое значение концентрации прибором не было зафиксировано (0,00 мг/м³). В связи с этим был проведен дополнительный эксперимент по фиксированию прибором (АЭРОКОН-П) стабильной концентрации. В лабораторную установку поочередно вносили навески разной массы (0,01-0,1; 0,1-1; 1-5). График зависимости фактической концентрации пыли от массы навески представлен ниже.

Исследуя изменение концентрации пыли при внесении навесок разной массы (рис. 24) наилучшей массой (при внесении 5 г пыли концентрация снижалась до 1,5 мг/м³ и поддерживалась в течение 30 мин) для проведения эксперимента оказалась навеска массой 5 г. Для корректного определения изменения концентрации прибором, навеска исследуемой пыли была увеличена до 5 г, с целью повышения концентрации мелкодисперсной пыли (1-10 мкм), используемой в эксперименте [121]. Дальнейшее увеличение массы навески пыли продуктов подготовки

железорудного концентрата не проводилось, с целью экономии исследуемого материала.

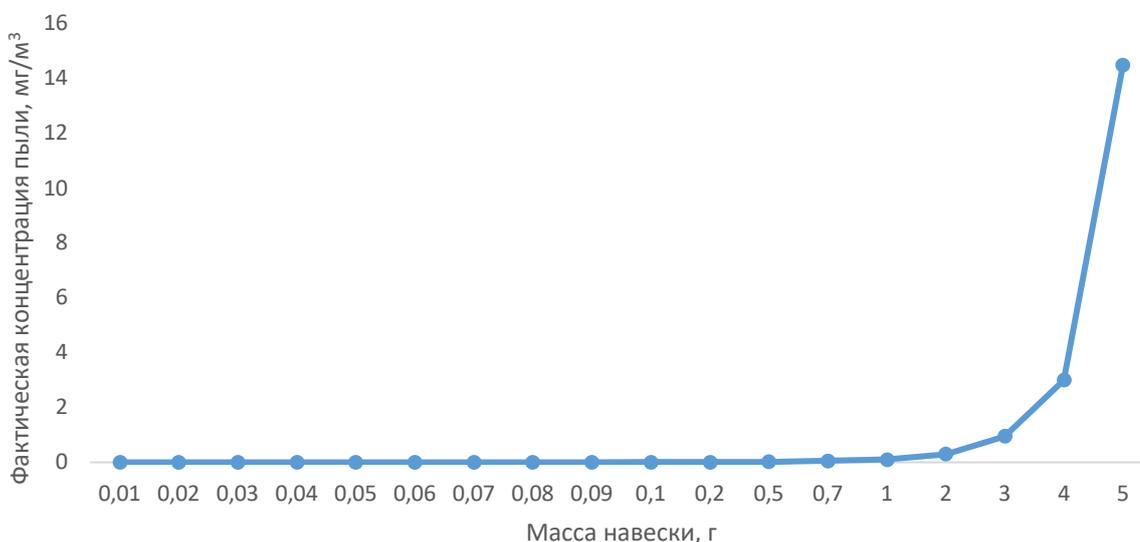


Рисунок 24 - График зависимости фактической концентрации пыли от массы навески

2.4 Схема и параметры проведения эксперимента по осаждению пыли исследуемыми способами

Для проведения эксперимента по осаждению пыли железорудного концентрата была разработана лабораторная установка (рис. 25). Данная установка представляет собой прозрачный куб объемом 1 м³ из органического стекла в каркасе из сборного алюминиевого профиля. В качестве прибора для измерения осаждения пыли использовался измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц АЭРОКОН-П, предназначенный для измерения массовой концентрации пыли различного происхождения и химического состава. Описанный выше прибор фиксирует дисперсность исследуемых частиц до 10 мкм с разрешающей способностью 0,01 мг/м³.

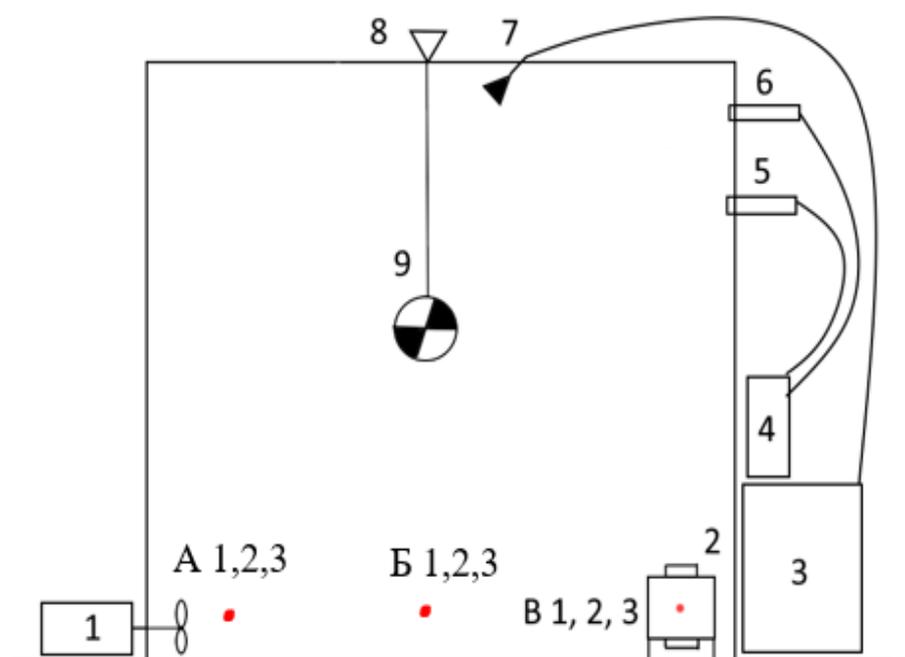
Схема проведения эксперимента, представленная на рисунке выше, обозначена буквами А, Б, В и соответствует направлению расположения датчика АЭРОКОН-П (позиция 2, рис. 25). Цифры 1, 2 и 3 (находящиеся рядом с буквами)

соответствуют точкам проведения эксперимента. Согласно описанной выше схеме, эксперимент проводился по всей площади дна лабораторного бокса, а именно в 9-и его точках, поскольку такое расположение дает возможность определить время осаждения максимального количества частиц исследуемой пробы пыли продуктов подготовки железорудного концентрата [122].

Эксперименты по осаждению пыли производились при контроле параметров микроклимата. Данные параметры на момент проведения эксперимента по осаждению контролировались при помощи метеометра TESTO 435 (позиция 4, рис. 25). При проведении экспериментов по осаждению пыли метеометр использовался для контроля параметров пылевоздушной среды в лабораторном боксе, таких как температура и влажность воздуха. Это позволило установить начальные условия эксперимента и провести его в контролируемых условиях.

При помощи данного прибора осуществлялся контроль влажности воздуха внутри стенда в диапазоне от 25-30 % и температуры воздуха в диапазоне от 22-25 °С. Контроль скорости движения воздуха, исходящей от генератора воздушного потока, осуществлялся при помощи цифрового крыльчатого анемометра (4 м/с). Прибор был установлен в центре дна лабораторного бокса (на схеме лабораторной установки не представлен).

Для моделирования системы орошения использовалась установка, предназначенная для туманообразования в лабораторном стенде посредством распыления жидкости из различных форсунок – E218 (позиция 3, рис. 25). Рабочее давление данной установки составляет 5,4 МПа, а максимальное - 12,41 МПа. Для эксперимента в данной установке использовались форсунки на 15 и 10 мкм (позиция 7, рис. 25).



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

Рисунок 25 – Лабораторная установка для осаждения пыли со схемой
 проведения эксперимента

В качестве устройства, моделирующего пульсирующую вентиляцию был представлен пульсатор (позиция 9, рис. 25), установленный внутри лабораторного бокса, представляющий собой полимерную трубу, диаметром 100 мм и длиной 570 мм, выбранной произвольно, поскольку в рамках данного исследования длина трубы не имеет существенного значения. Основная задача пульсатора, в рамках данного исследования, создать импульс давления произвольного значения. Площадь сечения данной трубы составляет $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. С одной стороны трубы находится вентилятор, подающий воздух со скоростью 5 м/с (расход воздуха $104 \text{ м}^3/\text{час}$), а с другой пульсатор. Пульсатор имеет в своей конструкции подвижный и статичный сегменты. Статичный сегмент имеет отверстие площадью $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а подвижный сегмент вращается с частотой от 16-600 об/мин. Схема работы пульсатора представлена на рисунке 26 [123, 124].

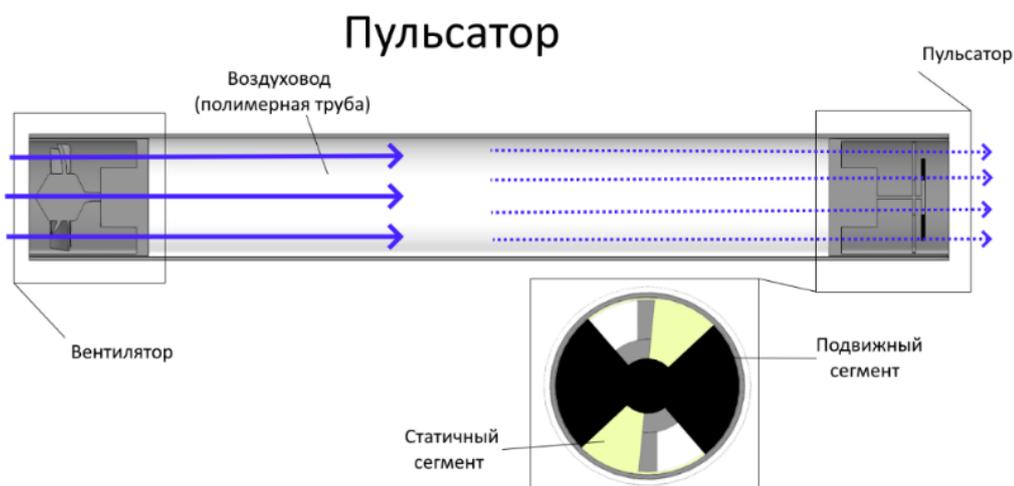


Рисунок 26 – Схема работы пульсатора, используемого в эксперименте

2.5 Проведение эксперимента по осаждению пыли

Эксперимент по осаждению пыли проводился в лабораторном боксе, который описан выше, согласно всем параметрам микроклимата контролирующийся приборами. Навеску пыли массой 5 г. вводили в объем лабораторного бокса в течении 3-5 секунду через засыпную воронку (позиция 8, рис. 25). При этом генератор воздушного потока был включен на максимальную мощность и осуществлял подачу воздуха со скоростью 4 м/с, что позволяло мелкодисперсным частицам пыли витать в объеме воздуха лабораторного стенда. Измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц АЭРОКОН-П регистрировал концентрации пыли каждые 5 с, посредством вывода значений на экран компьютера. Эксперимент по осаждению пыли заканчивался в то время, когда значение концентрации пыли, фиксируемое прибором, соответствовало 0,00 мг/м³. При достижении данного значения считается, что вся пыль в лабораторном боксе осадилась.

При данных условиях для достоверности экспериментальных данных было проведено 10 экспериментов по осаждению. Результаты данных экспериментов были обработаны, проанализированы и сведены в графики. Графики зависимости

значений концентрации пыли при проведении 10 экспериментов от времени осаждения приведены на рисунке 25.

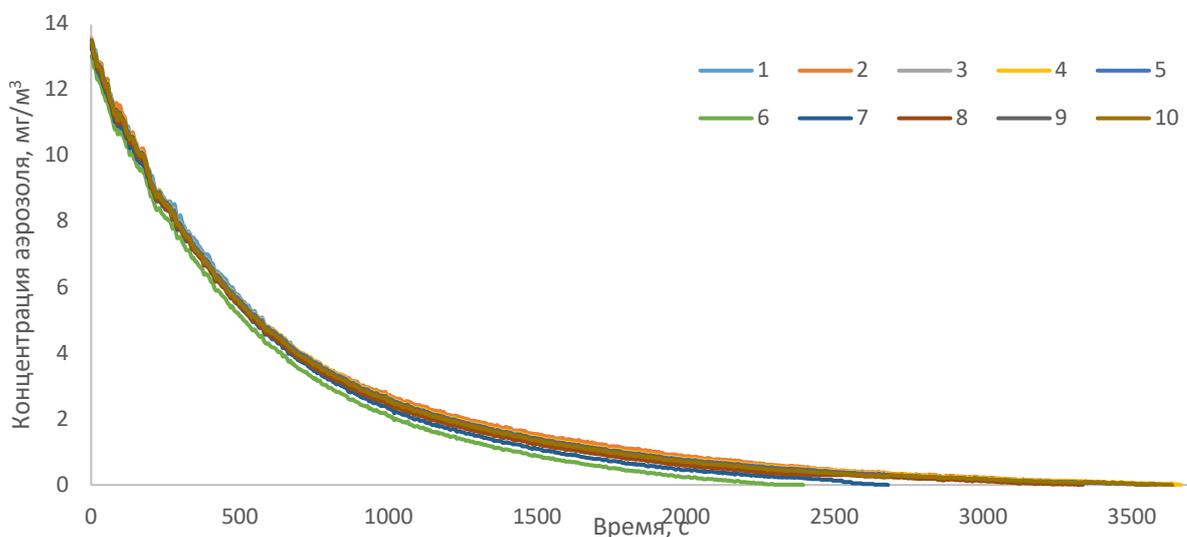


Рисунок 27 - Графики изменения концентрации пыли от времени при проведении 10 экспериментов

Согласно рисунку 27 среднее значение времени осаждения пыли без использования орошения и пульсирующей вентиляции составляет в среднем 3665 с (61 мин). В течение этого времени пыль витает в воздухе рабочей зоны и наносит вред оборудованию. По прошествии выше указанного времени данная пыль бесконтрольно осаждается на движущихся частях оборудования, что приводит к ее окускованию и укрупнению. Поскольку укрупненная пыль собирается на подвижных частях, движение которых приводят к ее уплотнению, у такой пыли увеличивается плотность, что может привести к выводу оборудования из строя и к последующей аварии на данном оборудовании [75, 96].

Также данная пыль оказывает негативное воздействие на персонал предприятия, что может в перспективе привести к увеличению количества профессиональных заболеваний дыхательных путей рабочих. Полученное значение времени осаждения потребуется для определения эффективности пылеосаждения орошением, при помощи пульсирующей вентиляции.

2.6 Проведение эксперимента по осаждению пыли орошением

Согласно полученным ранее зависимостям изменения концентрации пыли во времени были проведены экспериментальные исследования процесса пылеосаждения методом орошения с целью количественной оценки эффективности применяемого способа. Эксперименты осуществлялись при строго регламентированных параметрах микроклимата лабораторного стенда, включающих температуру воздуха в диапазоне 20–25 °С и относительную влажность 25–30 %, что обеспечивало воспроизводимость и сопоставимость полученных результатов. Контроль температуры и влажности воздуха внутри лабораторного стенда посредством приборов во время проведения эксперимента позволяет корректировать (на начальном этапе эксперимента) параметры микроклимата. В итоге, проведение данных действий способствует получению более точных данных концентрации аэрозоля и времени его осаждения [121].

Используя аналогичные параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха, при проведении эксперимента по пылеосаждению, исследования по осаждению аэрозоля проводились при поочередном использовании 3-х форсунок (10, 15 и 20 мкм) и контроле подаваемого давления (5,4 МПа) жидкости. Также осуществлялся контроль относительной влажности воздуха при орошении в диапазоне от 40-60 %. Для достоверности полученных данных было проведено 10 экспериментов по осаждению аэрозоля с использованием 3-х форсунок. Результаты экспериментов обработаны и представлены в виде графиков зависимости средних значений концентрации от времени осаждения аэрозолей (рис. 28-30).

Согласно графикам, представленным на рисунке 28, среднее значение времени осаждения аэрозоля при использовании форсунок на 10 мкм, составляет 2215 с (≈ 36 мин). Эффективность данного способа, относительно времени самоосаждения пыли, составляет порядка 40%. Согласно рисунку 29, при использовании форсунки на 15 мкм, среднее время осаждения аэрозоля составляет 2695 с (≈ 45 мин.). Эффективность осаждения пыли при использовании орошения с

форсункой на 15 мкм относительно самоосаждения пыли составляет 26,5%. При анализе рисунка 30, где указаны результаты осаждения орошением с форсункой на 20 мкм, время осаждения составило 2785 с (≈ 46 мин.). Эффективность осаждения орошением исследуемой пыли с форсункой на 20 мкм составляет 24%.

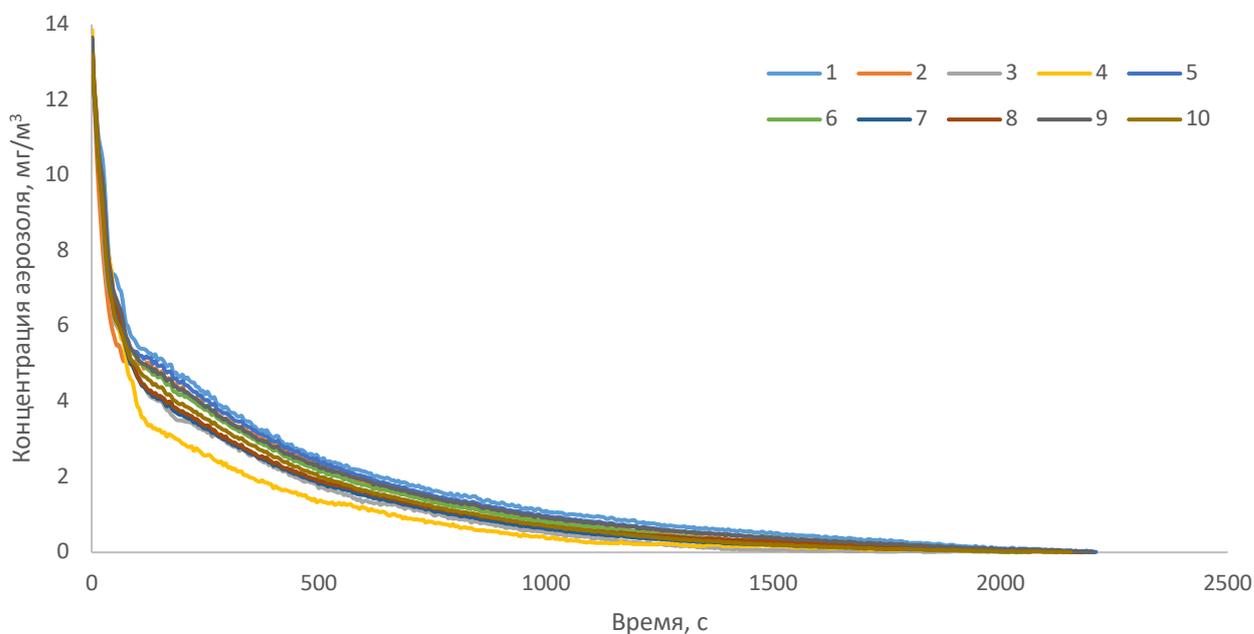


Рисунок 28 – Графики изменения концентрации аэрозоля от времени (форсунка 10 мкм) при проведении 10 экспериментов

Согласно проведенным экспериментам, использование форсунки на 15 мкм и 20 мкм снижает эффективность орошения пыли ППЖК, относительно применения орошения с форсункой на 10 мкм, на 21,7% и 25,7% соответственно. Поскольку размер капель, образующихся при использовании форсунок на 15 мкм и 20 мкм, больше, чем при использовании форсунки на 10 мкм, частицы мелкодисперсной пыли реже сталкиваются с большими каплями. Процесс коагуляции мелкодисперсных частичек пыли ППЖК и воды происходит менее эффективно.

Мелкодисперсные капли, образованные в процессе орошения при использовании форсунки на 10 мкм, лучше увлажняют воздух и могут использоваться в тех местах технологического производства, где капли больших

размеров могут нанести ущерб. После определения времени осаждения пыли при орошении, требуется провести эксперимент по осаждению аэрозоля с применением пульсирующей вентиляции [121].

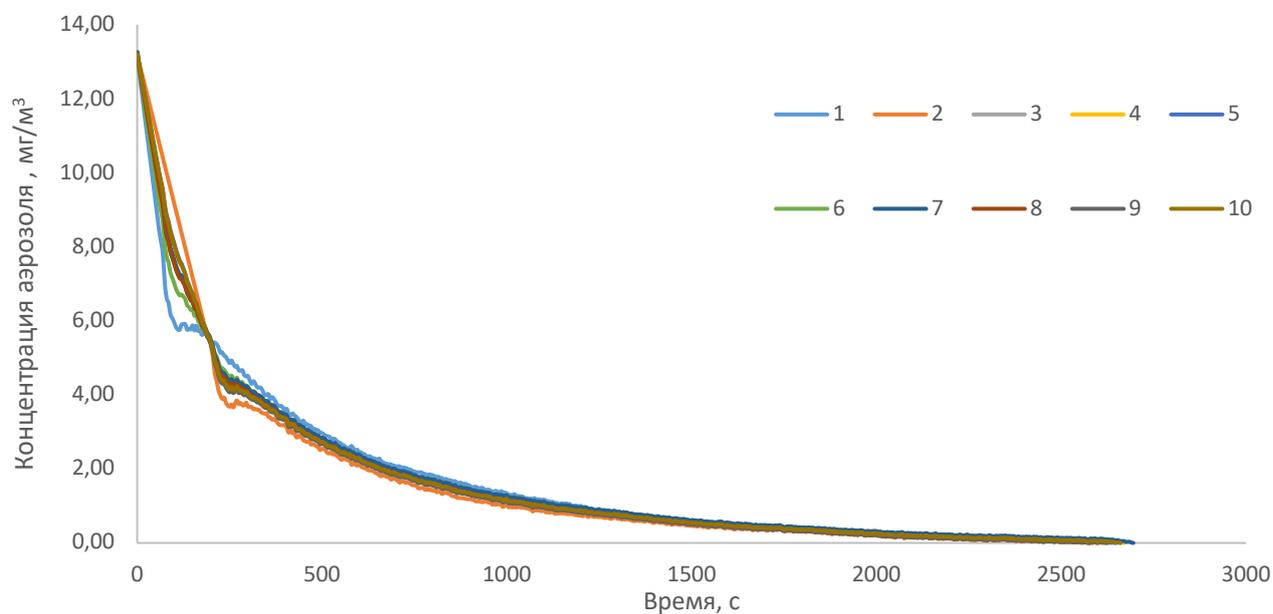


Рисунок 29 – Графики изменения концентрации аэрозоля от времени при орошении (форсунка 15 мкм) при проведении 10 экспериментов

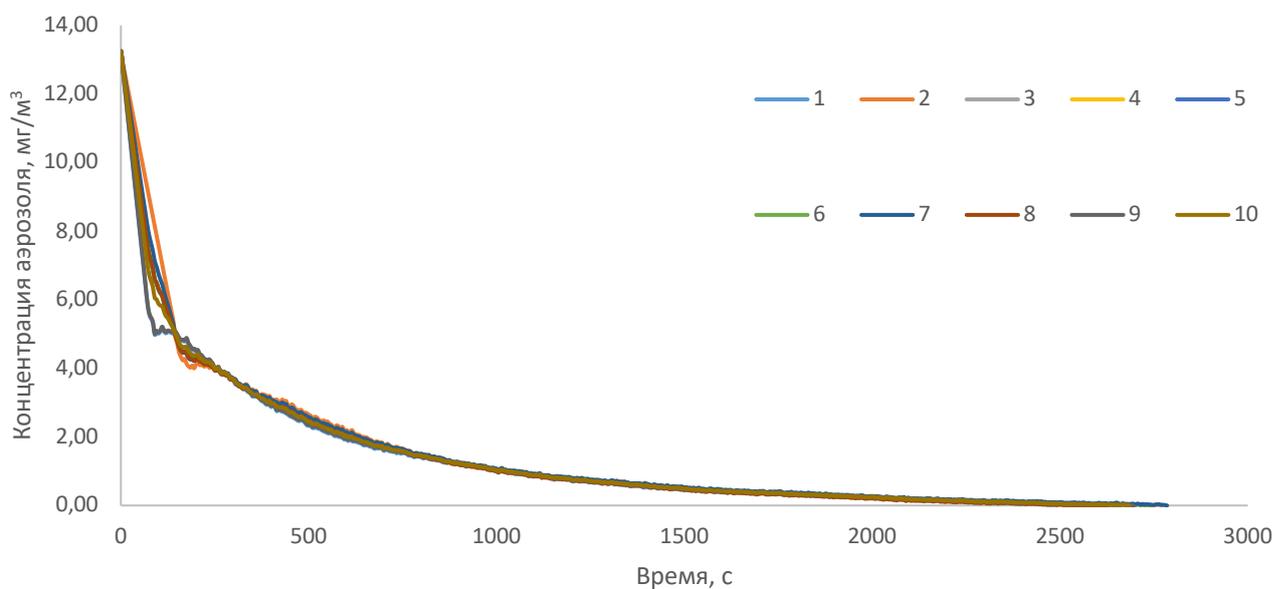


Рисунок 30 – Графики изменения концентрации аэрозоля от времени при орошении (форсунка 20 мкм) при проведении 10 экспериментов

2.7 Проведение эксперимента по осаждению пыли орошением с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции

При проведении эксперимента по осаждению пыли с применением метода пульсирующей вентиляции также учитываются параметры микроклимата, используемые в предшествующих экспериментах, и параметры пульсатора, описанного выше. Согласно проведенным экспериментам по осаждению аэрозоля пульсирующей вентиляцией, удалось установить параметры пульсатора, позволяющие получить увеличение эффективности метода пылеосаждения орошением [125]:

- скорость движения воздуха в воздуховоде пульсатора – не более 5 м/с;
- частота вращения лопастей подвижного сегмента пульсатора – 190-200 об/мин (13 Гц);
- площадь воздушных проемов пульсатора – $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Согласно описанным выше параметрам, были проведены эксперименты по осаждению пыли ППЖК при комбинированном применении орошения с использованием 3-х форсунок (10, 15 и 20 мкм) и метода пульсирующей вентиляции. Результаты проведенных экспериментов были обработаны и сведены в графики, представленные на рисунках 31-33.

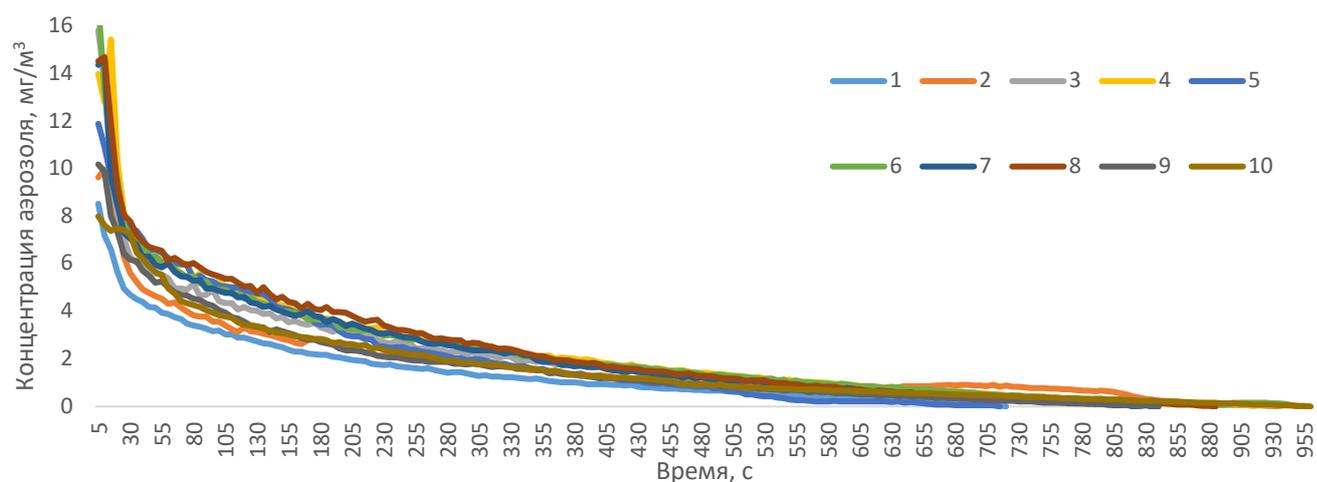


Рисунок 31 – График изменения концентрации пыли от времени при орошении (форсунка 10 мкм) с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции при проведении 10 экспериментов

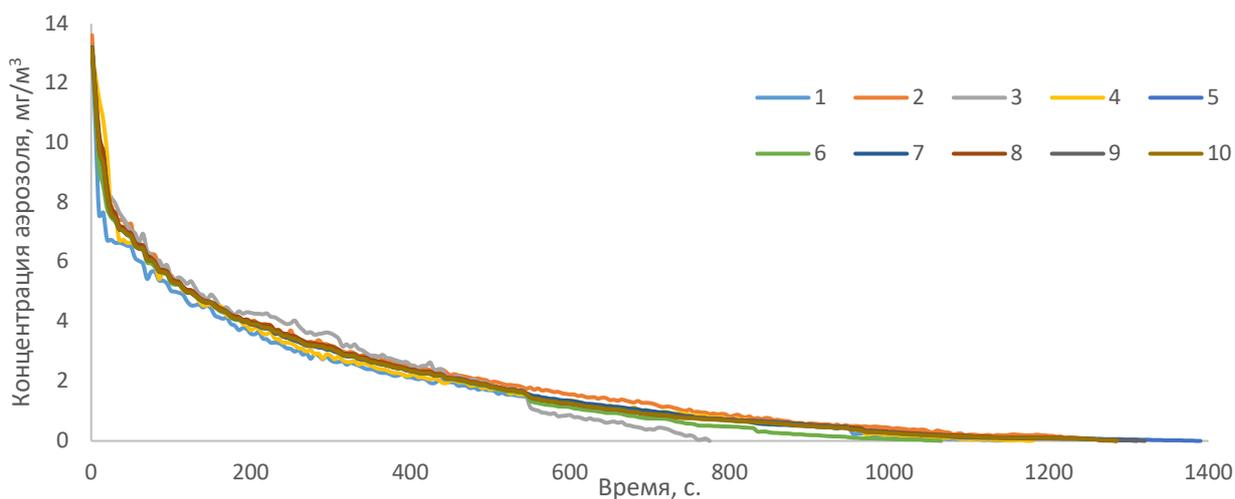


Рисунок 32 – График изменения концентрации пыли от времени при орошении (форсунка 15 мкм) с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции при проведении 10 экспериментов

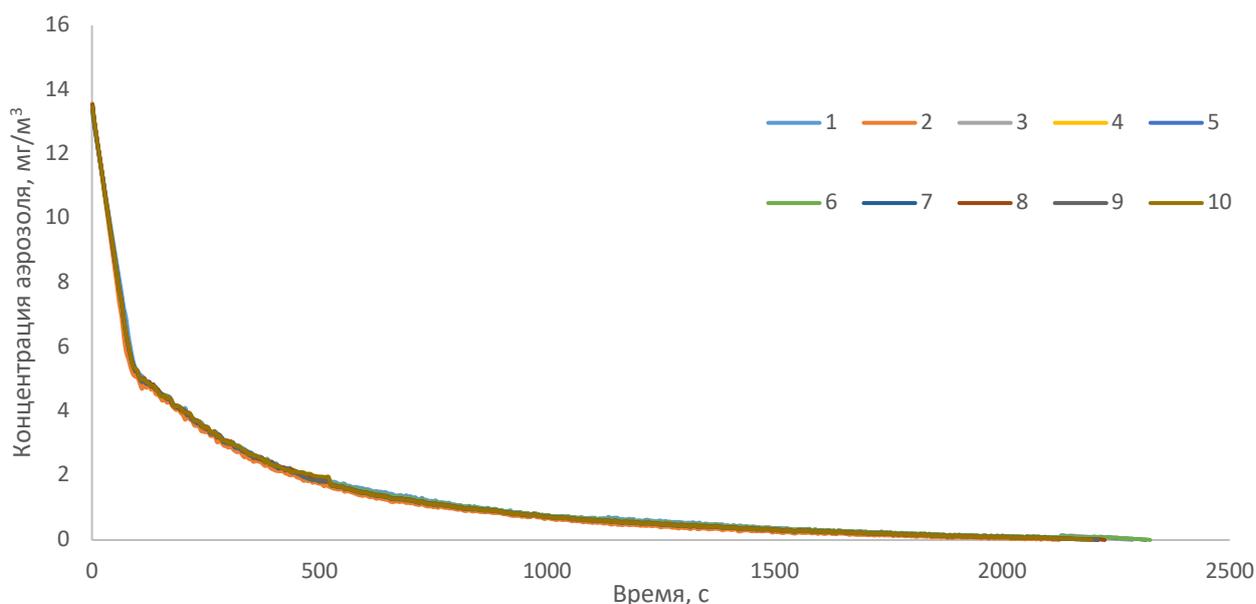


Рисунок 33 – График изменения концентрации пыли от времени при орошении (форсунка 20 мкм) с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции при проведении 10 экспериментов

Согласно рисункам 31–33, время осаждения при комбинированном использовании орошения и метода пульсирующей вентиляции увеличивается при увеличении диаметра форсунок. Поскольку при использовании метода пульсирующей вентиляции при осаждении аэрозоля с форсункой на 15 мкм и 20

мкм не дало удовлетворительного результата (время осаждения увеличивалось), для наглядности результатов эксперимента значения концентраций аэрозоля при использовании 3 форсунок были усреднены и представлены в виде графика на рисунке 34.

Анализируя зависимости, представленные на рисунке 34, видно, что при использовании для пылеосаждения комбинированного метода увеличение диаметра форсунки способствует снижению эффективности осаждения пыли. Время осаждения комбинированным методом с применением форсунки на 15 мкм и 20 мкм составляет 1295 с и 2325 с соответственно. При использовании форсунки с меньшим диаметром (10 мкм) – 955 с. При использовании форсунки с диаметром в 15 мкм эффективность осаждения снижается на 35,6 %, а при использовании форсунки на 20 мкм – на 43,4%.

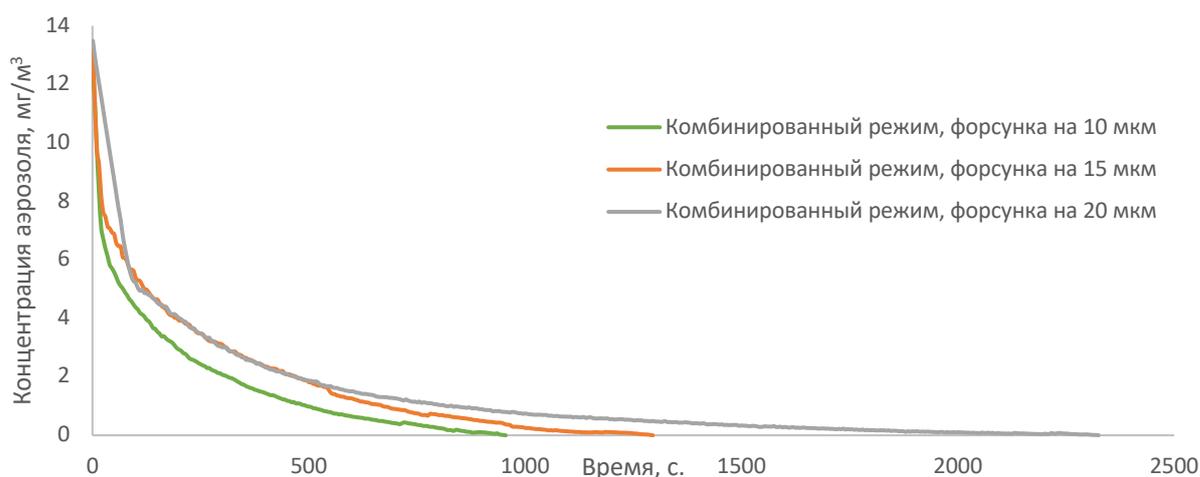


Рисунок 34 – График изменения концентрации пыли от времени при орошении (форсунка 10, 15 и 20 мкм) с дополнительным применением метода пульсирующей вентиляции

2.8 Исследование изменения концентрации аэрозоля от времени в зависимости от частоты вращения воздушного пульсатора

Для обеспечения достоверности полученных данных в описанных выше условиях была проведена серия экспериментов по осаждению пыли ППЖК

комбинированным методом при различных частотах вращения пульсатора (вращение подвижного сегмента). Повторные эксперименты позволили подтвердить идентичность процесса осаждения, снизить погрешность и повысить чистоту эксперимента, исключив грубые ошибки (случайную погрешность). Каждое повторение эксперимента следовало стандартной процедуре, включающей контроль параметров микроклимата (аналогичных предыдущим экспериментам), таких как температура и влажность, а также поддержание стабильной скорости воздушного потока.

Результаты проведённых экспериментов были обработаны, проанализированы и сведены в графики. На рисунке 35 представлены графики зависимостей значений концентрации исследуемого аэрозоля от времени осаждения при различных частотах, полученные при проведении нескольких экспериментов. Эти графики позволяют наглядно оценить динамику изменения концентрации пыли в воздухе в процессе осаждения и сравнить результаты различных серий испытаний в зависимости от использования различной частоты, применяемой при пылеосаждении методом пульсирующей вентиляции [125].

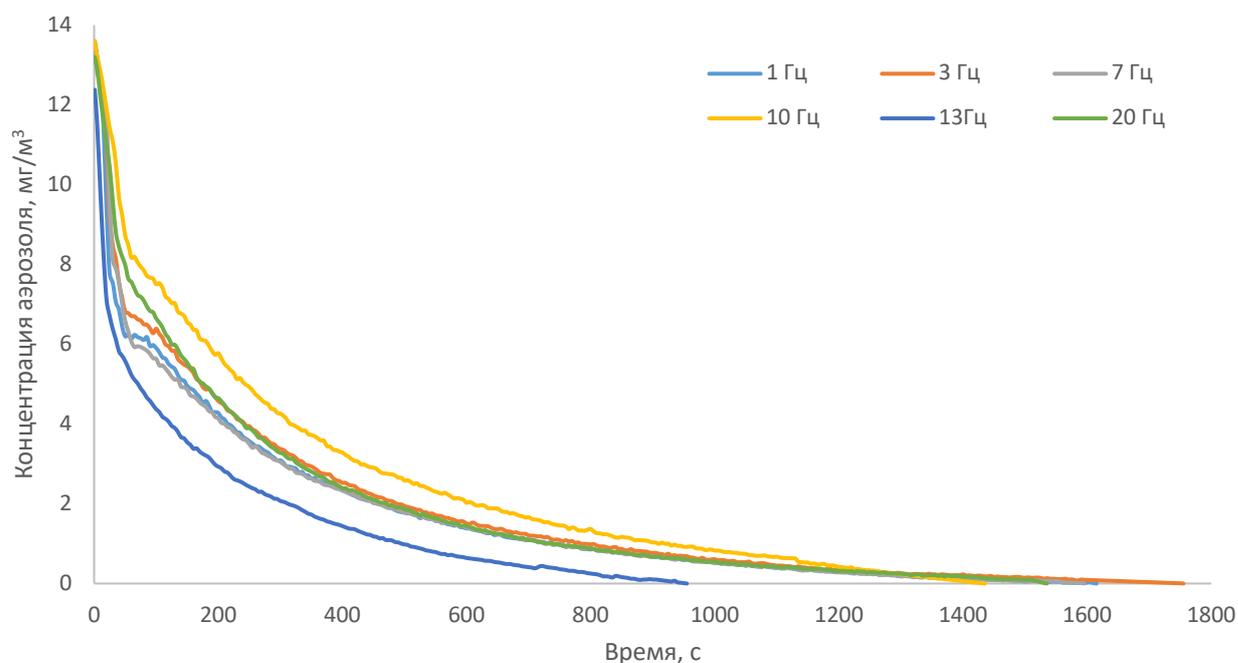


Рисунок 35 - Графики изменения концентрации аэрозоля от времени в зависимости от частоты воздушного пульсатора

Согласно представленному выше графику, наибольшая эффективность осаждения наблюдается при использовании частоты в области 13 Гц. Наименьшая эффективность осаждения наблюдается при использовании частоты оборотов воздушного пульсатора в области 3 Гц. Для наглядности и обработки полученных данных результаты были сведены в гистограмму (рис. 36).

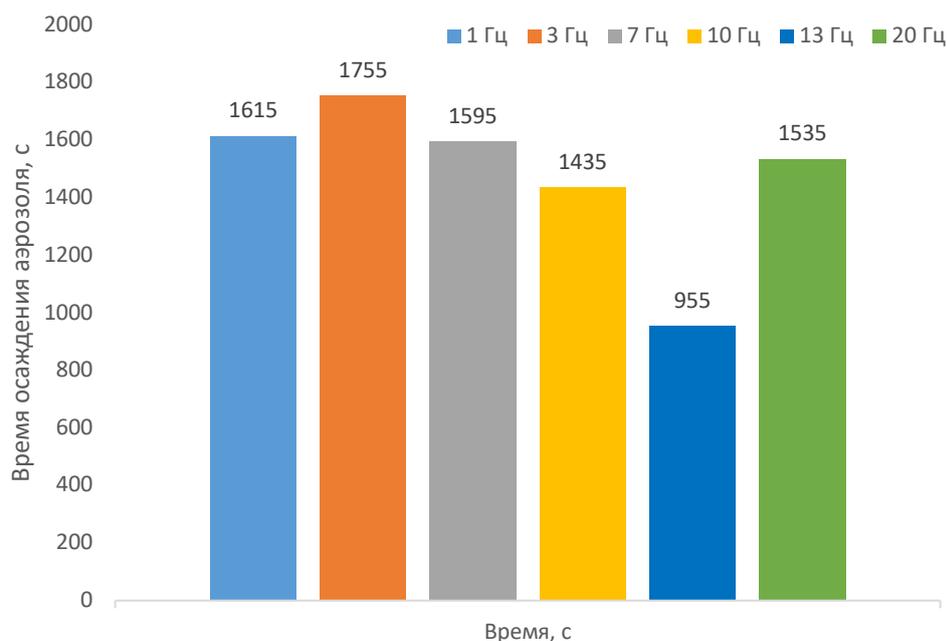


Рисунок 36 – Зависимость времени пылеосаждения орошением, с применением метода пульсирующей вентиляции, при различных частотах пульсатора

Согласно рисунку 36, наиболее эффективной частотой пульсирующего устройства, оказывающей влияние на пылеосаждение орошением, является зона в 13 Гц. По сравнению с частотой в 10 Гц эффективность увеличивается на 50,2 %, а по сравнению с 3 Гц – на 81,7 %. Таким образом, оптимизация использования частоты импульсов при их генерации воздушным пульсатором повышает эффективность и требует, соответственно, учесть конструкторские решения при изготовлении устройств «воздушный пульсатор» и создания необходимого режима импульсов давления в системе «пыль-вода-воздух».

2.9 Исследование изменения концентрации аэрозоля от времени в зависимости от расхода воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор

При исследовании процесса осаждения пыли ППЖК проводили эксперименты по осаждению пыли комбинированным методом с изменением расхода воздуха, подаваемого на пульсатор. При пылеосаждении комбинированным методом фиксировались параметры частоты пульсирующего устройства, диаметра форсунок, использующихся при орошении, а также отслеживались параметры микроклимата. Поскольку предыдущие эксперименты позволили выявить влияющие параметры и их значения, позволяющие повысить эффективность осаждения, эксперимент с изменением расхода воздуха производился по аналогичной программе. Результаты экспериментов приведены на рисунке – 37–39.

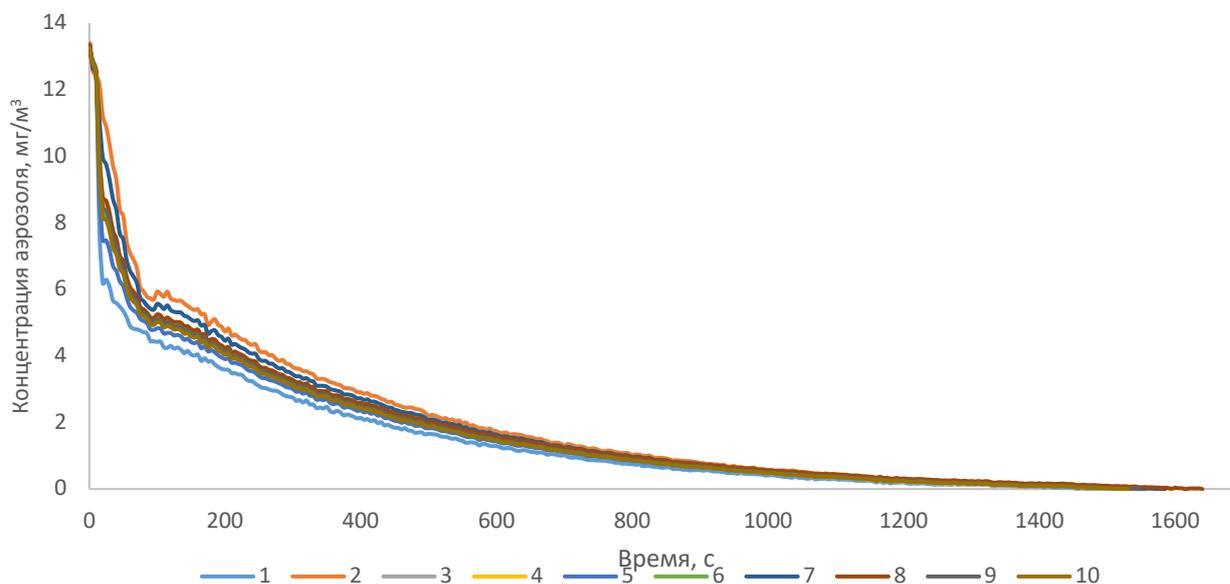


Рисунок 37 - Графики изменения концентрации аэрозоля от времени, при расходе воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор, равному $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ при проведении 10 экспериментов

Согласно рисункам 37–39, при малом расходе воздуха ($50 \text{ м}^3/\text{ч}$) концентрация аэрозоля снижается примерно в 2,5 раза за первые 100 с, однако далее процесс

осаждения пыли происходит не так интенсивно. Увеличение расхода до $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ способствует наименее интенсивному осаждению в первые 100 с. За этот временной промежуток концентрация пыли снижается в 1,6 раза, однако далее процесс осаждения происходит более интенсивно. Повышая расход воздуха, подающегося на пульсатор до $90 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация в первые 100 с снижается в 2,8 раза, что также видно из усредненных графиков зависимости концентрации пыли ППЖК при осаждении комбинированным методом, используя различный расход воздуха, подаваемого на пульсатор, представленных на рисунке 40.

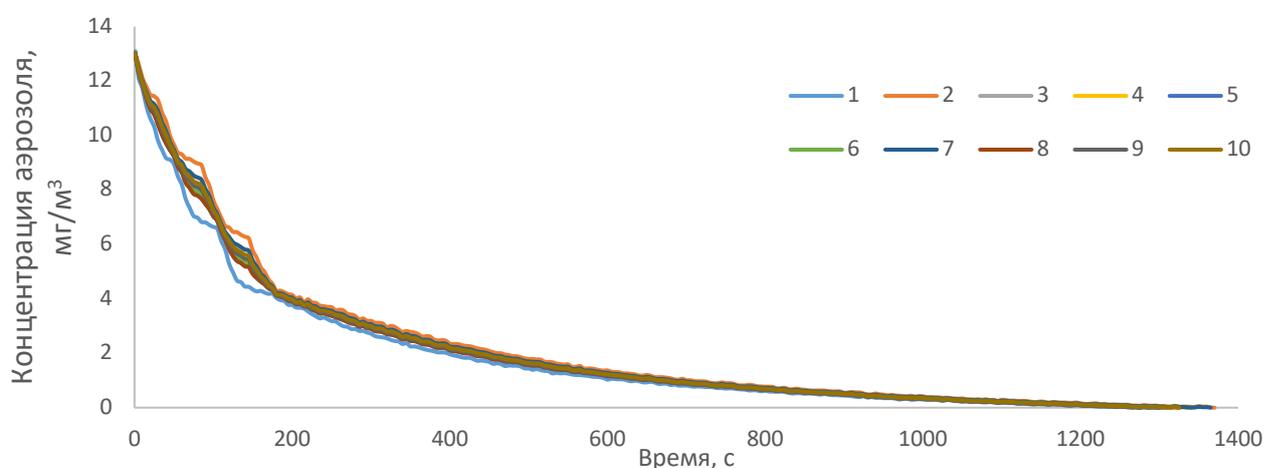


Рисунок 38 - Графики изменения концентрации аэрозоля от времени, при расходе воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор, равному $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ при проведении 10 экспериментов

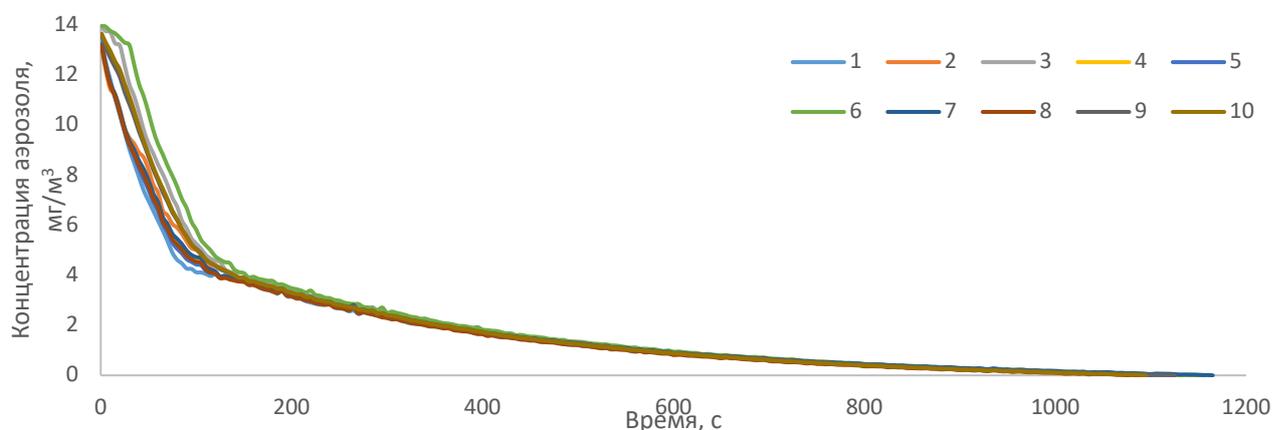


Рисунок 39 - Графики изменения концентрации аэрозоля от времени, при расходе воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор, равному $90 \text{ м}^3/\text{ч}$ при проведении 10 экспериментов

Согласно рисунку 40, на котором представлены усредненные зависимости концентраций при различных значениях расхода воздуха, видно, что при комбинированном режиме осаждения область расхода воздуха в 104 м³/ч является самой эффективной. Осаждение пыли ППЖК при описанном выше режиме является наиболее эффективной. Время осаждения при комбинированном режиме осаждения с расходом воздуха, подающемся на пульсатор, составляет 955 с, что подтверждает значение расхода воздуха, равное 104 м³/ч, как самое эффективное значение из исследуемых.

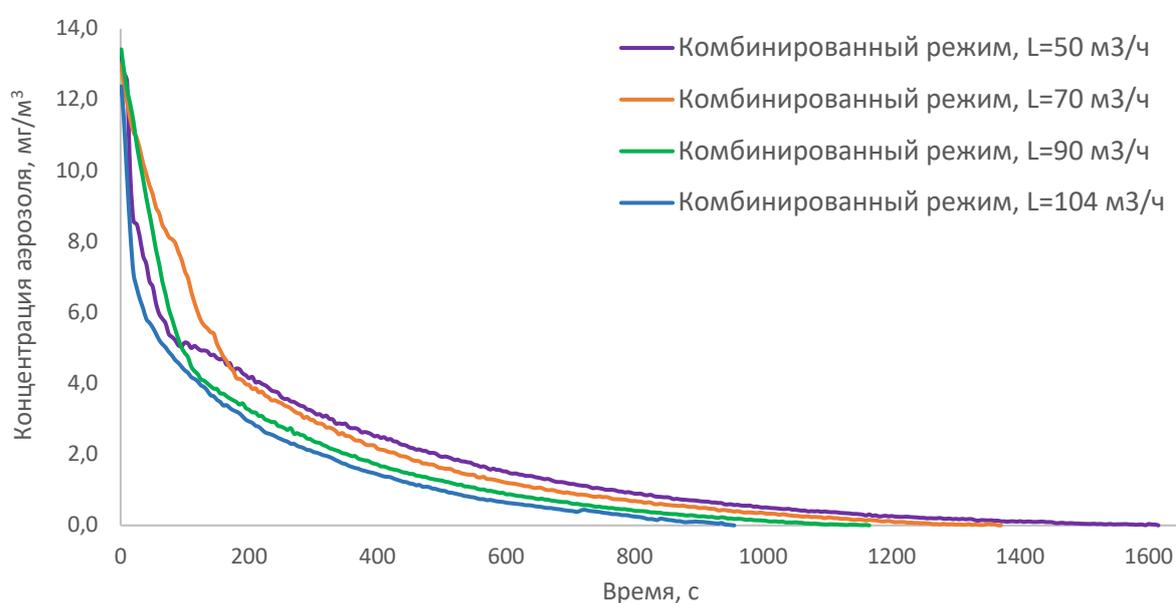


Рисунок 40 - Графики изменения концентрации аэрозоля от времени, при исследуемых расходах воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор

2.10 Обработка результатов экспериментов

Для анализа проведенных экспериментов графики зависимости изменения концентрации пыли от проведенных ранее экспериментов были усреднены и наложены друг на друга. Сводный график изменения средних значений концентраций пыли от времени в условиях пылеосаждения, применения орошения (форсунка 10 мкм) и режимом пульсирующей вентиляции приведен на рисунке 41.

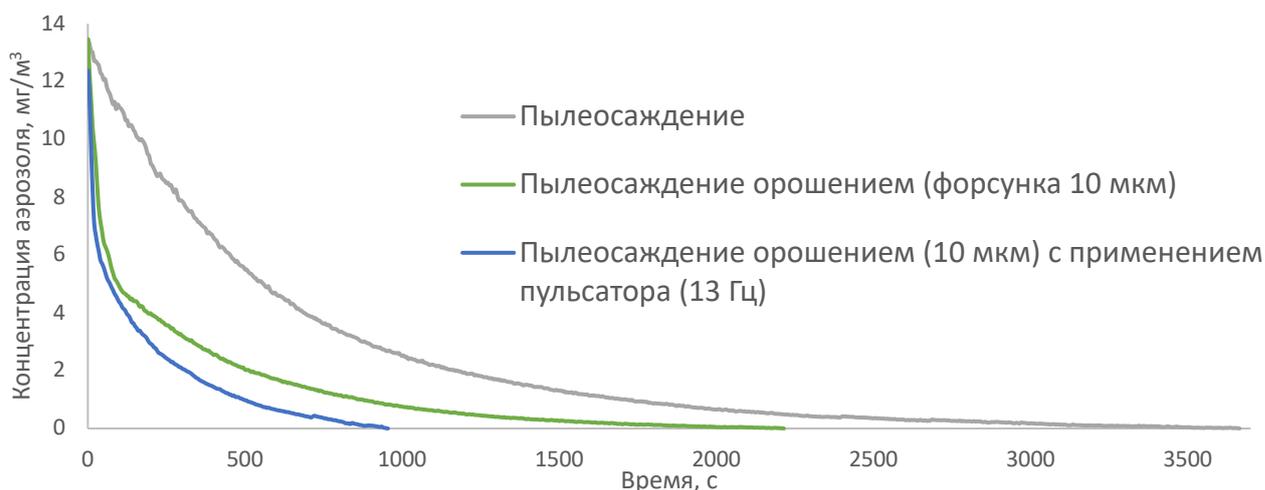


Рисунок 41 - График изменения концентраций пыли от времени в условиях пылеосаждения, пылеосаждения орошением (форсунка 10 мкм) и режимом пульсирующей вентиляции (13 Гц)

Согласно графикам, приведённым на рисунке 41, средние значения времени осаждения пыли, пылеосаждения орошением и пылеосаждения орошением с применением пульсирующей вентиляции составляет 3665 с., 2115 с. и 955 с. соответственно. Эффективность метода пылеосаждения аэрозоля орошением относительно самостоятельного осаждения пыли составляет – 42,3 %, а эффективность пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции – 74% [107, 121, 125].

Среднее значение времени пылеосаждения с использованием комбинированного метода (орошение (10 мкм) и метод пульсирующей вентиляции (зона 13 Гц)) - 955 с. Разница во времени осаждения между двумя способами пылеосаждения составляет 1160 с (19,3 мин). Эффективность данного метода относительно традиционного метода пылеосаждения орошением ≈ 55 %.

Поскольку исследуемые концентрации пыли при самоосаждении, осаждении орошением и осаждении орошением с применением метода пульсирующей вентиляции имеют неоднородность (значения концентрации пыли, полученные на измерительном оборудовании), для наиболее правильного интерпретирования результатов начальные значения концентрации при различных экспериментах

были уравнены, а полученные зависимости транспонированы в относительные величины.

Для предоставления поведения концентрации аэрозолей от времени в относительных величинах было рассчитано относительное изменение концентрации частиц от времени, согласно выражению 1, для всех проведенных экспериментов. Сначала проводился расчет для самоосаждения, пылеосаждения орошением (форсунка на 10 мкм) и пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции. Сводный график зависимостей относительного изменения концентрации аэрозолей, описанных выше, представлены на рисунке 42.

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

где C_n – концентрация аэрозоля в момент времени n , мг/м³; C_1 – концентрация аэрозоля в начале эксперимента, мг/м³

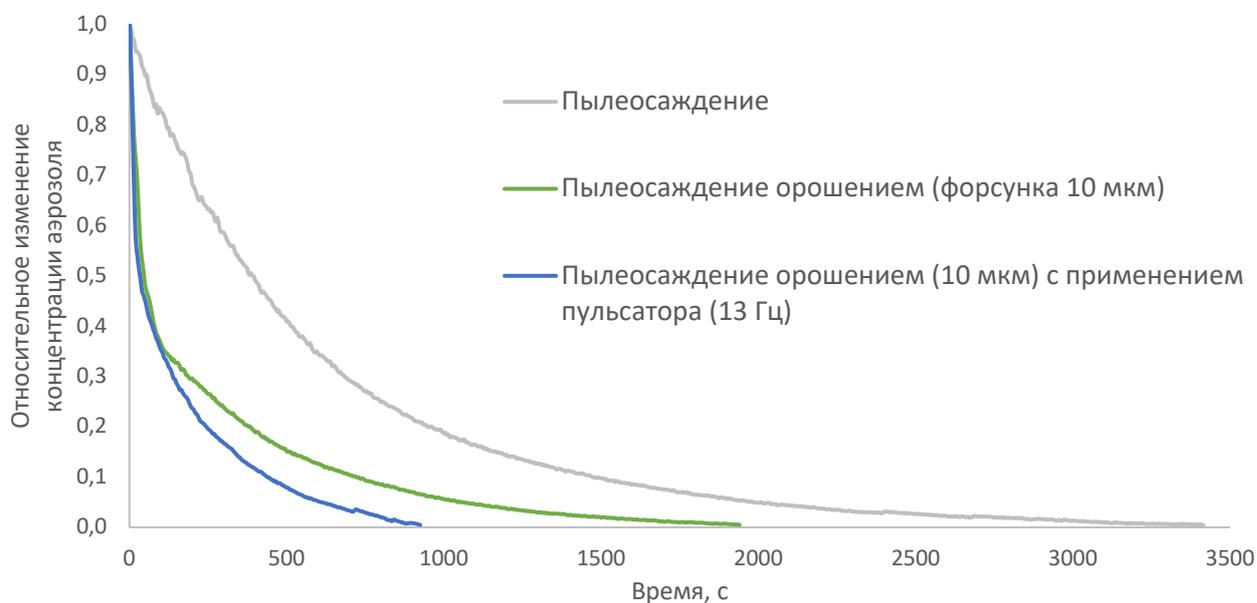


Рисунок 42 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени в условиях пылеосаждения, пылеосаждения орошением (форсунка 10 мкм) и режимом пульсирующей вентиляции (13 Гц)

Согласно рисунку 42, среднее время самоосаждения составляет 3415 с, осаждения орошением – 1940 с, а осаждение орошением с применением метода пульсирующей вентиляции – 925 с. Уточненные эффективности пылеосаждения различными методами относительно самоосаждения составили: пылеосаждение орошением – 43,2%, пылеосаждение орошением с применением метода пульсирующей вентиляции – $\approx 73\%$. Уточненное значение эффективности осаждения методом пульсирующей вентиляции по сравнению с орошением – 50,7%.

Далее производился расчет относительного изменения концентрации частиц от времени для осаждения аэрозолей орошением с форсунками на 10, 15 и 20 мкм. Сводный график зависимостей относительного изменения концентрации аэрозолей при орошении и самостоятельного пылеосаждения от времени представлен на рисунке 43 [107, 121, 125].

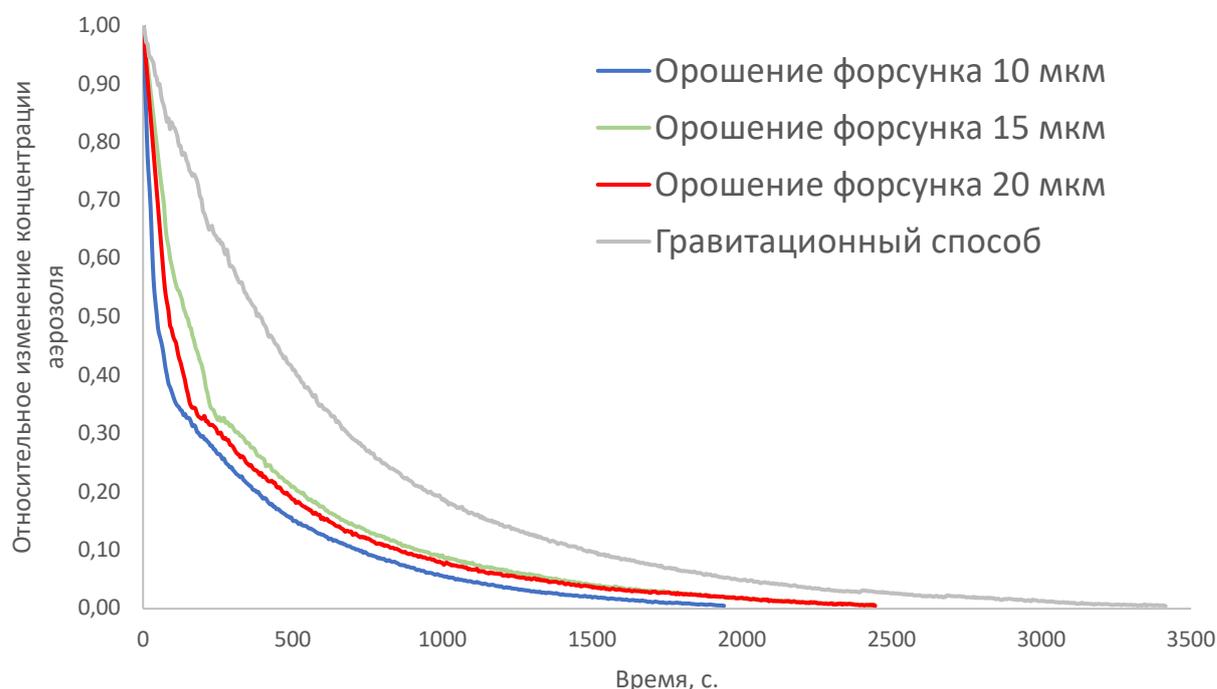


Рисунок 43 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени при орошении с использованием форсунок на 10, 15 и 20 мкм

Согласно рисунку 43, среднее время самоосаждения пыли составляет 3415 с, осаждения орошением с применением форсунки на 10, 15 и 20 мкм – 1940 с, 2440 с и 2445 с. соответственно. Уточненные эффективности пылеосаждения орошением с использованием форсунок на 10, 15 и 20 мкм относительно самоосаждения пыли составили - 43,2 %, 28,5% и 28,4%. При уточнении эффективности осаждения пыли орошением форсункой на 15 и 20 мкм по сравнению с орошением форсункой на 10 мкм снижение эффективности составляет 20,5% и 20,6% соответственно.

Также требовалось провести расчет относительного изменения концентрации частиц от времени для осаждения аэрозолей комбинированным методом с форсунками на 10, 15 и 20 мкм. Сводный график зависимостей относительного изменения концентрации аэрозолей при осаждении комбинированным методом и самостоятельного пылеосаждения от времени представлен на рисунке 44.

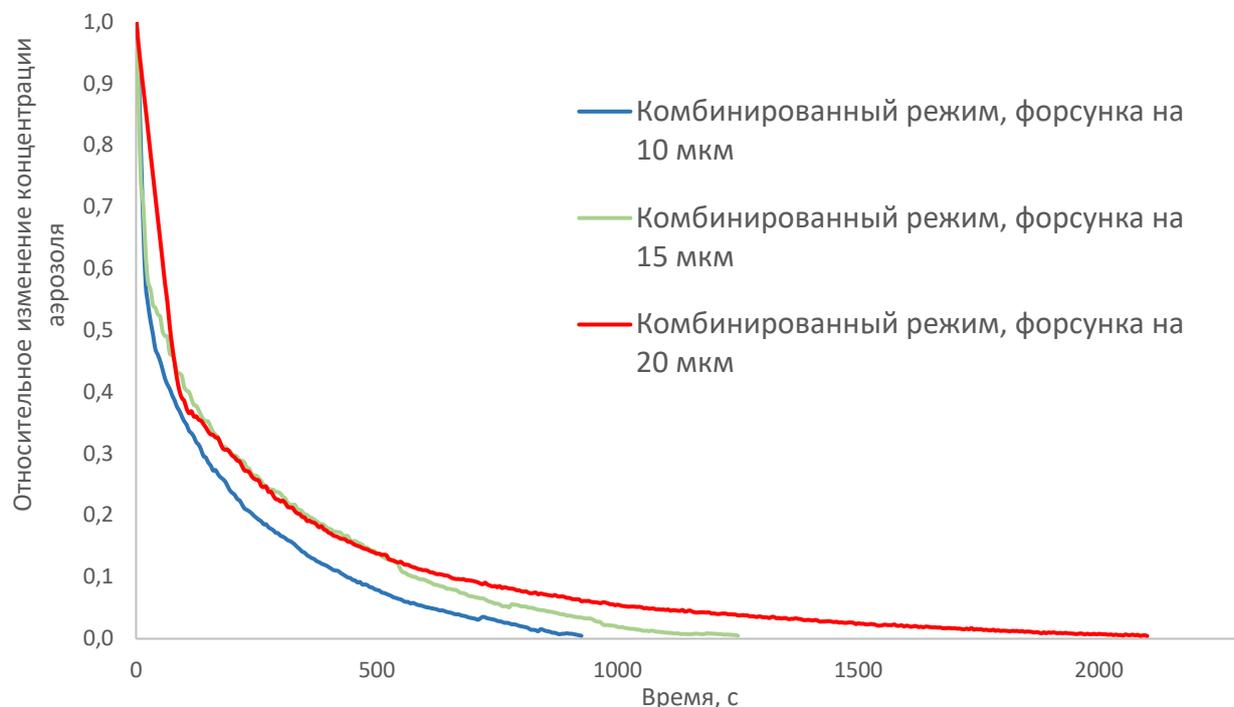


Рисунок 44 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозолей от времени при орошении с использованием форсунок на 10 и 15 мкм

Согласно рисунку 44, среднее время осаждения пыли ППЖК с комбинированным методом с применением форсунки на 10, 15 и 20 мкм – 925 с, 1250 с и 2100 с соответственно. Уточненные эффективности пылеосаждения комбинированным методом с использованием форсунок на 10, 15 и 20 мкм 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.

Поскольку в данном исследовании производился поиск рационального режима работы пульсирующего устройства для комбинированного метода пылеосаждения, расчет относительного изменения концентрации частиц от времени также был проведён и для этого этапа исследования, так как используемый измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц не менялся. Сводный график зависимостей относительного изменения концентрации аэрозоля при использовании комбинированного метода от времени, при разных режимах пульсирующего устройства, представлен на рисунке 45 [107, 121, 125].

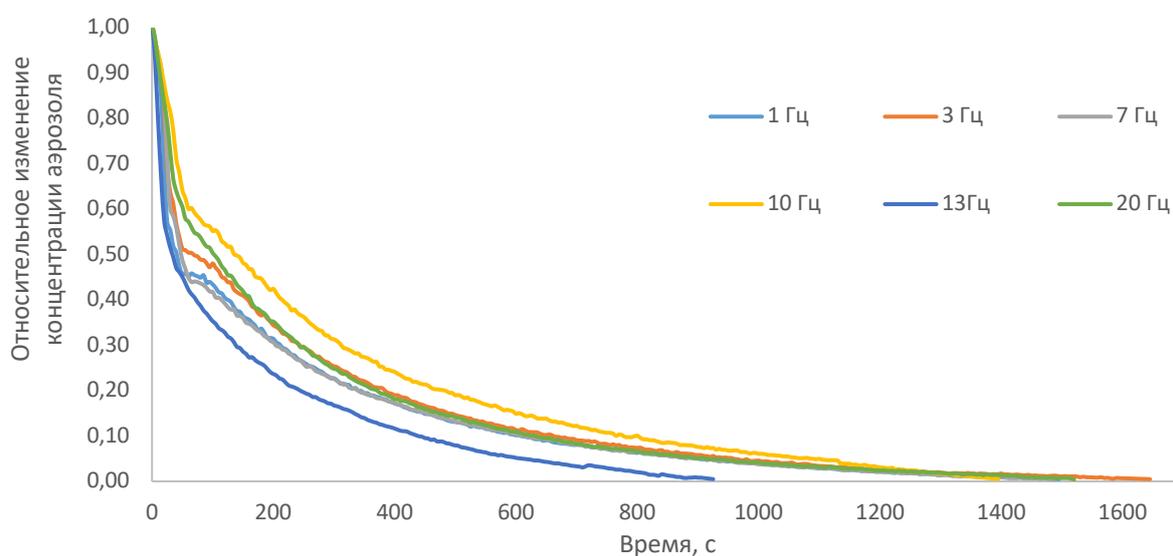


Рисунок 45 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозоля при использовании комбинированного метода от времени при различных режимах работы пульсирующего устройства

Согласно рисунку 45 видно влияние различного режима пульсирующего устройства. Наименьшее время осаждения, при корректировании результатов экспериментов, наблюдается при воздействии на аэрозоль с частотой вращения подвижного сегмента пульсатора в области 13 Гц. Наибольшее время осаждения - в области 20 Гц. Оптимальная частота вращения статичного сегмента пульсатора находится в области 13 Гц, что видно из рисунка 46, сформированного на основании корректировки времени осаждения.

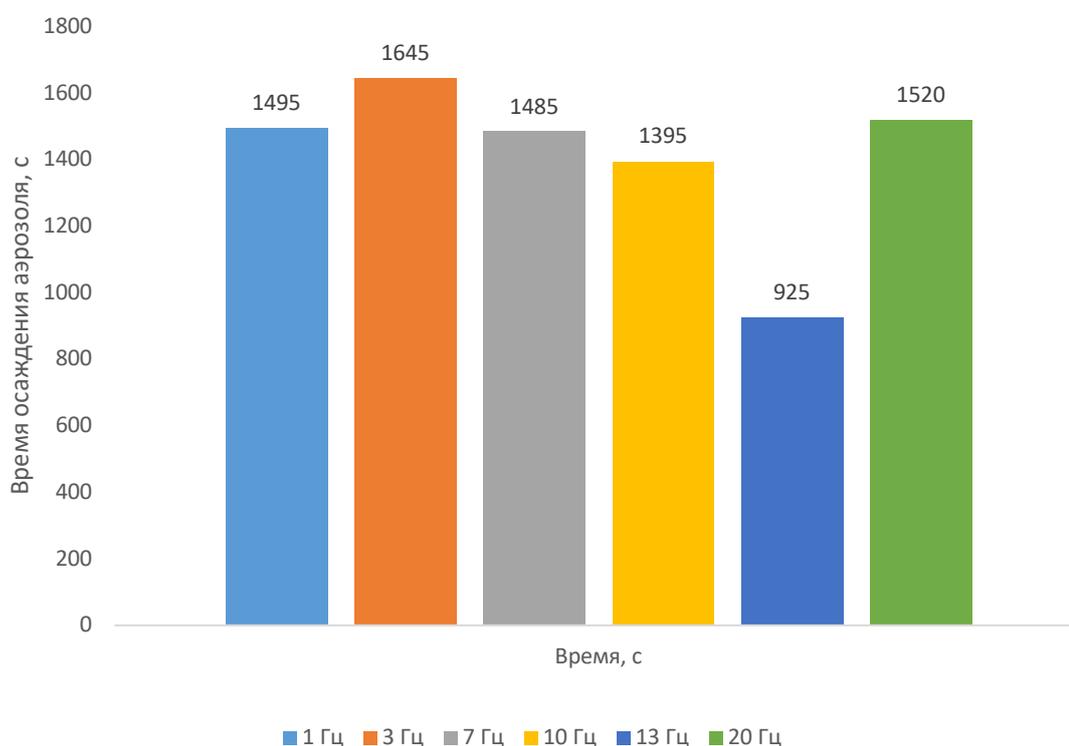


Рисунок 46 – Зависимость времени осаждения от применения различных частот воздушного пульсатора при осаждении аэрозоля комбинированным методом

Также были проведены эксперименты по различному позиционированию пульсирующего устройства. Эксперимент по осаждению проводился аналогично эксперименту, описанному выше, менялось лишь расположение пульсатора. Схема расположения пульсатора приведена на рисунке 47 [107, 121, 125].

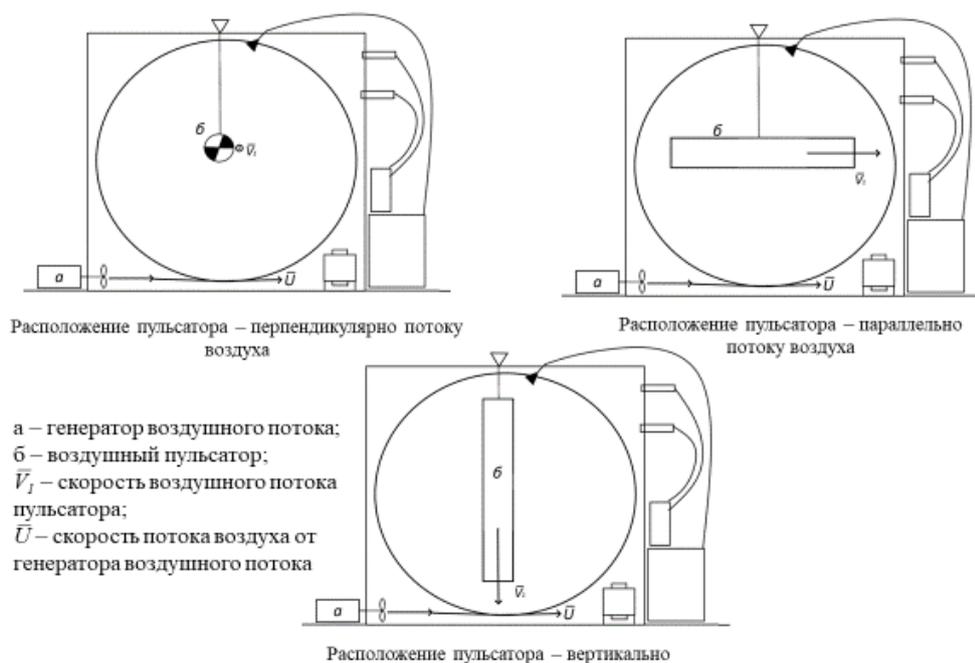


Рисунок 47 – Схема расположения пульсатора при проведении экспериментов по осаждению пыли комбинированным методом с различным позиционированием пульсатора

Результаты, полученные при проведении экспериментов, были обработаны согласно выражению 1 и сведены в графики, представленные на рисунке 48, показывающие относительное изменение концентрации аэрозоля при использовании комбинированного метода от времени осаждения при различных расположениях пульсирующего устройства.

Согласно графикам, представленным на рисунке 48, видно, что при вертикальном расположении пульсатора пыль большой концентрации осаждается эффективнее, но при снижении концентрации данный эффект теряется. Традиционное расположение (перпендикулярно воздушному потоку), используемое ранее в экспериментах по осаждению, позволяет осадить пыль большей концентрации менее эффективно, но осаждение при данном позиционировании происходит быстрее. На рисунке 49 представлена диаграмма, показывающая время осаждения пыли в зависимости от расположения пульсирующего устройства.

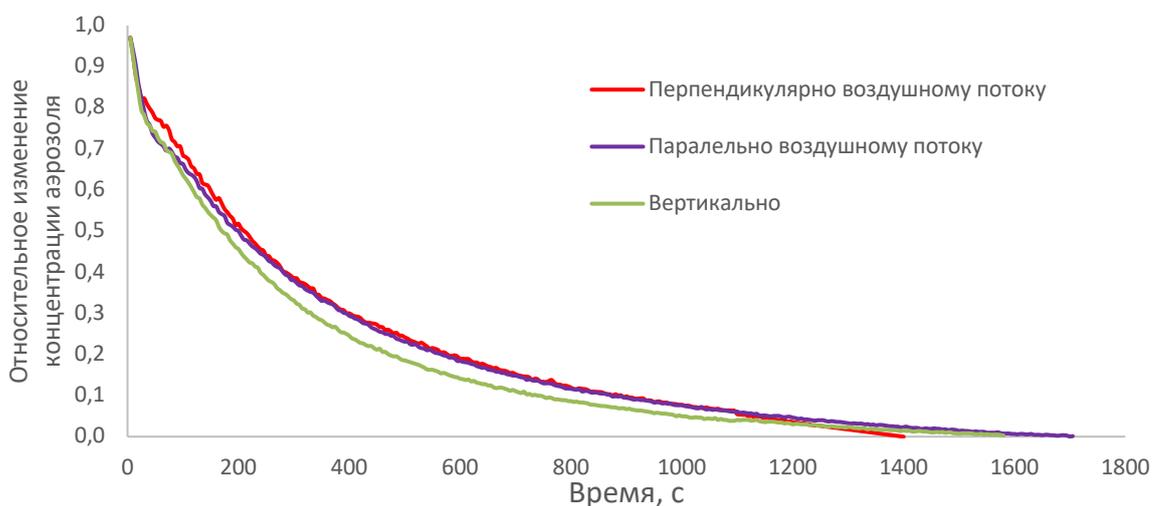


Рисунок 48 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозоля от времени комбинированным методом, при различных схемах проведения эксперимента

Согласно рисунку 49, наименьшим временем осаждения обладает режим, при котором пульсатор располагается перпендикулярно воздушному потоку. Время осаждения при таком расположении составляет 23,3 мин. При расположении пульсатора параллельно или вертикально воздушному потоку время осаждения составляет 28,4 мин и 26,3 мин соответственно. Согласно данным экспериментам рациональным расположением пульсатора является расположение пульсатора перпендикулярно потоку воздуха.



Рисунок 49 - Распределение времени осаждения аэрозоля комбинированным методом, в зависимости от схемы проведения эксперимента

Эксперименты по оценке влияния расхода воздуха на комбинированный режим осаждения были обработаны в соответствии с выражением 1 и сведены в графики зависимости относительного изменения концентрации аэрозоля от времени. Результаты такого преобразования на рисунке 50.

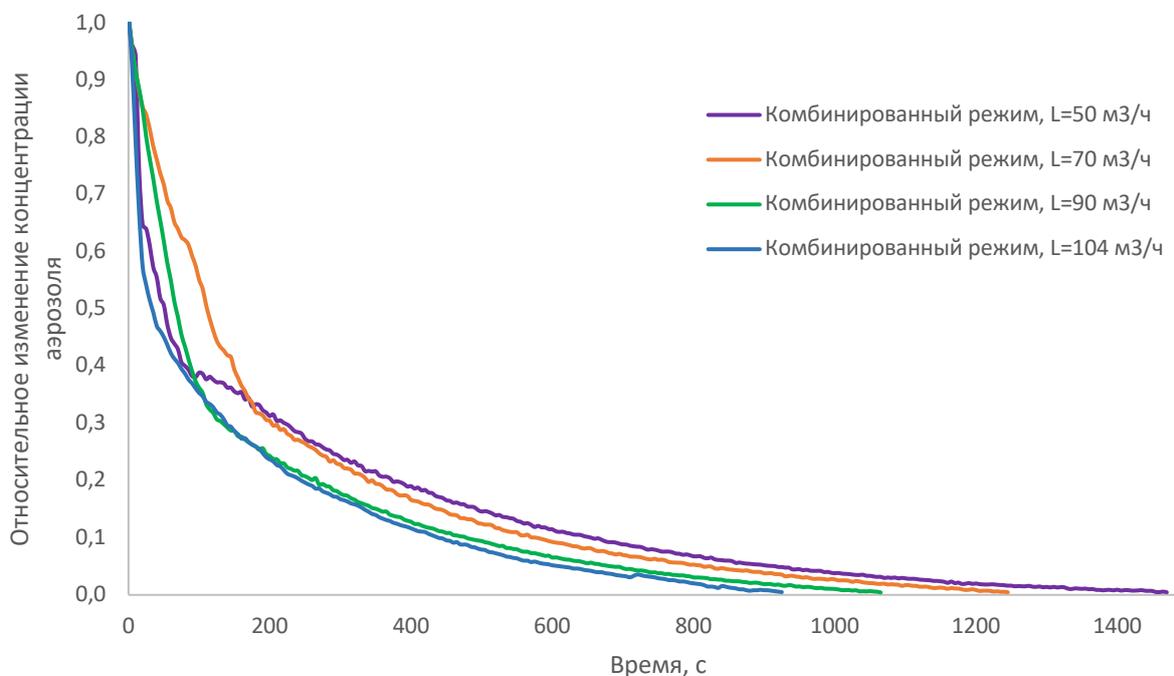


Рисунок 50 – Зависимость относительного изменения концентрации аэрозоля от времени, при исследуемых расходах воздуха, подаваемого на воздушный пульсатор

Согласно рисунку 50, время осаждения при использовании различных расходов воздуха изменилось. При использовании расхода воздуха равного 50 м³/ч составило 1470 с, при 70 м³/ч – 1245 с, при 90 м³/ч – 1065 с. Использование эффективного расхода равного 104 м³/ч, также претерпело незначительное изменение и составляет 925 с. Основываясь на проанализированных зависимостях можно сделать вывод о том, что расход, равный 104 м³/ч, - наиболее эффективный из исследуемых.

Были выполнены дополнительные эксперименты по определению концентрации аэрозоля с использованием гранулометрического (весового) метода

[126], обеспечивающего прямую оценку массового содержания дисперсной фракции в воздушном потоке. Полученные данные представлены в относительных величинах на рисунке 51, что позволяет сопоставить их с результатами, полученными альтернативным методом измерений. Проведённый сравнительный анализ показал, что расхождение между двумя независимыми способами определения концентрации аэрозоля не превышает 25%, что свидетельствует о высокой согласованности экспериментальных данных и подтверждает достоверность выполненного исследования.

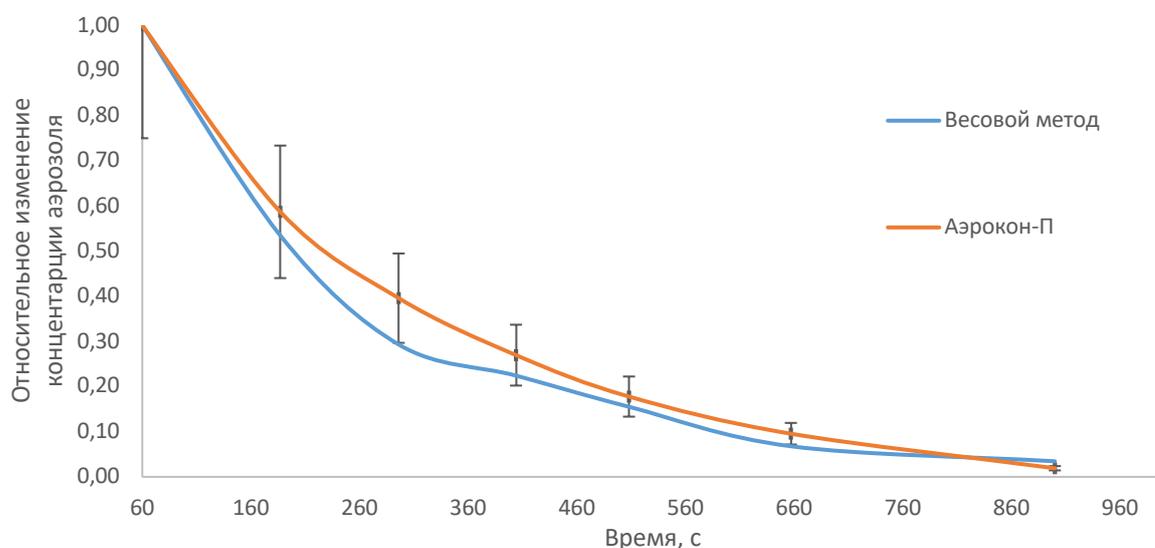


Рисунок 51 - Зависимость относительного изменения концентрации аэрозоля от времени при использовании гранулометрического метода измерения концентрации и измерителя массовой концентрации аэрозольных частиц «Аэрокон-П»

Поскольку результаты экспериментов по осаждению аэрозоля, полученные с применением прибора «Аэрокон-П», сопоставимы с данными, определёнными весовым методом, и их расхождение не превышает 25%, возникла необходимость корректировки значения эффективности комбинированного метода осаждения аэрозоля, по сравнению с традиционным осаждением орошением. В рамках проведённой обработки данных значение эффективности было пропорционально снижено на указанную величину, что позволило минимизировать влияние систематических отклонений двух методик.

Выводы по главе 2

В результате комплекса экспериментальных и расчётно-аналитических исследований процессов пылеосаждения была установлена количественная эффективность комбинированного метода по сравнению с традиционными механизмами удаления пылевых частиц из воздушной среды. Так, обобщённая эффективность пылеосаждения при использовании комбинированного воздействия, включающего орошение и пульсирующее аэродинамическое влияние, относительно классического водяного орошения составила 50,7 %, а по отношению к гравитационному осаждению — 73 %. Полученные значения свидетельствуют о принципиальном усилении процессов коагуляции и инерционного захвата пылевых частиц, а также о снижении времени их пребывания во взвешенном состоянии в рабочем объёме.

Анализ экспериментальных данных для режима пылеосаждения, реализуемого исключительно за счёт орошения, показал существенную зависимость кинетики осаждения от дисперсного состава распыляемой жидкости, определяемого диаметром форсунок. В частности, при использовании форсунок с характерным размером капель 10 мкм время осаждения пыли составило 32 мин, тогда как при увеличении диаметра капель до 15 и 20 мкм указанное время возрастало до 40,6 и 40,75 мин соответственно. Соответствующие расчётные значения эффективности пылеосаждения относительно гравитационного механизма осаждения достигали 43,2 % для форсунки диаметром 10 мкм, в то время как для форсунок 15 и 20 мкм данный показатель снижался до 28,5 и 28,4 %, что указывает на ограниченную результативность укрупнённых капель в условиях тонкодисперсной пылевой фазы.

При переходе к комбинированному режиму пылеосаждения было установлено выраженное сокращение времени осаждения и одновременное повышение его эффективности, особенно при использовании мелкодисперсного орошения. Так, для форсунки с диаметром 10 мкм время осаждения сократилось до 15 мин, при этом эффективность относительно гравитационного осаждения достигла 73 %. Для форсунки 15 мкм соответствующие значения составили 21 мин

и 62 %, тогда как при диаметре 20 мкм наблюдалось увеличение времени осаждения до 39 мин и снижение эффективности до 28,4 %, что фактически нивелирует преимущества комбинированного воздействия при укрупнённой дисперсии капель.

Дополнительные экспериментальные исследования параметров пульсирующего режима позволили определить рациональные диапазоны его реализации. В частности, установлено, что максимальная эффективность пылеосаждения достигается при частоте пульсаций порядка 13 Гц, что обеспечивает оптимальную комбинацию возмущения воздушного потока и интенсификации столкновений пылевых частиц с каплями жидкости. Эксперименты по варьированию пространственного расположения пульсирующего устройства показали целесообразность его ориентации перпендикулярно основному воздушному потоку, что способствует формированию развитой турбулентной структуры. Кроме того, при изменении расхода воздуха на пульсаторе был выявлен рациональный диапазон 90–104 м³/ч, в пределах которого достигается наибольшая стабильность режима и максимальная эффективность процессов пылеподавления.

Для обоснования эффективности применения метода пульсирующей вентиляции требуется разработать математическую модель осаждения частицы пыли, основываясь на полученных экспериментальных данных. Путем анализа и применения этой математической модели можно определить оптимальные параметры (диаметр форсунки для орошения, частоту воздействующих пульсаций, расход воздуха, подаваемого на пульсирующее устройство) осаждения пыли, рассчитывая концентрацию или время осаждения пыли.

3. Математическое моделирование комбинированного метода осаждения пыли руды железной агломерационной участка разгрузки ПШЖК

Исследование процессов массопереноса, как физическое явление, имеет большое практическое значение для многих научных и инженерных задач. Физические явления, такие как диффузия, конвекция и осаждение, оказывают влияние на перемещение пыли в атмосфере и на распределение загрязнения в окружающей среде. В настоящее время изучение процессов массопереноса аэрозолей в различных отраслях промышленности, начиная с добычи полезных ископаемых и металлургии, заканчивая пищевой промышленностью и фармакологией, является одним из актуальных направлений научных исследований. Пыль, которая образуется в процессе металлургического производства, является частично оксидами металлов, в том числе тяжелых металлов, которые могут иметь токсичные свойства и наносить вред не только здоровью людей и окружающей среде, но и ухудшать надёжность оборудования, что может привести к авариям. Изучение процессов массопереноса пыли позволяет определить основные источники пыли на производстве и выявить механизмы ее распространения в атмосфере. Также позволяет определить наиболее эффективные методы ее сбора и очистки [127, 128, 129].

Для исследования процессов массопереноса пыли применяются различные методы, такие как математическое моделирование, экспериментальные исследования на модельных установках и в реальных условиях производства, использование различных инструментов для измерения концентрации пыли в воздухе и других параметров. Математическое моделирование может использоваться для определения оптимальных параметров работы систем пылеосаждения, таких как время осаждения аэрозоля, его концентрация, частота работы пульсатора и диаметр форсунки. Разработанную математическую модель можно также использовать для определения оптимальных параметров конструкции устройств пылеосаждения. Математическое моделирование процессов массопереноса аэрозолей позволяет предсказать распространение пыли в

окружающей среде и оценить ее воздействие не только на оборудование производства, но и на здоровье людей и окружающую среду.

Экспериментальные исследования на модельных установках и в реальных условиях производства позволяют проверять результаты математического моделирования, а также определять наиболее эффективные методы пылеосаждения в зависимости от условий производства. Например, исследования могут проводиться для определения оптимальных параметров работы фильтров и электрофильтров, для определения оптимального расположения систем пылеулавливания в производственных цехах.

Изучение и совершенствование параметров пылеосаждения рабочей зоны этапа подготовки продуктов железорудного концентрата является актуальнейшей задачей для безопасного функционирования горно-металлургического производства. Одним из перспективных методов пылеосаждения может быть применение пульсирующей вентиляции, в паре с жидкостным орошением. Использование различных инструментов для измерения концентрации пыли в воздухе и других параметров позволяет контролировать уровень загрязнения в процессе эксплуатации систем пылеулавливания и определять необходимость проведения дополнительных мероприятий по снижению выбросов в атмосферу.

Поскольку на сегодняшний день описанный выше метод не имеет научного обоснования своей эффективности [130–134], были проведены необходимые эксперименты. Для достижения желаемого результата требуется, путем математического моделирования, обосновать используемые при экспериментах параметры, необходимые для выполнения поставленной задачи пылеосаждения.

3.1 Разработка математической модели осаждения пыли комбинированным методом, с помощью машинного обучения

Машинное обучение — направление искусственного интеллекта, в котором системы обучаются на данных, а нейронные сети как класс таких моделей (сеть взаимосвязанных «нейронов») эффективно выявляют сложные закономерности в

технических данных, ускоряя получение новых знаний и заменяя более трудоёмкие традиционные подходы [135–137]. Модели машинного обучения описывают количественную связь между структурой и свойствами, аппроксимируя зависимость $y=f(x)$ по обучающей выборке и оценивая качество предсказаний на независимой тестовой выборке, при этом в ансамблевых методах итоговый прогноз формируется коллективом моделей (часто на основе деревьев решений), построенных как иерархия правил вида «если..., то...» [138]. Алгоритм случайного леса (RF, Random Forest) представляет собой ансамблевый метод на основе деревьев решений: при построении каждого узла случайным образом отбирается ограниченное число дескрипторов, из которых выбирают признак, обеспечивающий наилучшее разделение выборки, а многократное повторение этой процедуры формирует множество разнообразных деревьев, совместное решение которых повышает точность и устойчивость модели. [139, 140]

В качестве начального этапа машинного обучения требовалось разработать математическую модель массопереноса пыли с учетом орошения и метода пульсирующей вентиляции на основе экспериментальных данных. Для построения такой модели воспользовались методом «случайного леса», реализованном в библиотеке `sklearn` языка программирования `python`. Для этого требовалось подготовить набор экспериментальных данных, представляющих зависимость физических параметров эксперимента от времени. Пример такого набора данных представлен в таблице 8.

Для простоты обработки данных факторы эксперимента были заменены на значения V1-V10. Параметры микроклимата и физические характеристики устройств, при которых проводился эксперимент, были зафиксированы в формате диапазона, значения параметров V4-V8 представлены в массиве данных в качестве диапазона. Значения времени осаждения и концентрации пыли, расхода воздуха и частоты на пульсаторе (V1, V2, V9, V10 соответственно) были внесены в набор данных из результатов эксперимента.

Таблица 8 - Пример набора данных эксперимента по осаждению аэрозоля комбинированным методом

Время, t , с	Концентрация C , мг/м ³	Диаметр форсунки, D , мкм	Скорость движения воздуха в лаб.	Температура нач., $T_{нач}$, С ^о	Относительная влажность нач., $R_{влаж}$ %	Масса навески пыли, m кг	Дисперсность пыли, сред, d , мкм	Расход воздуха, пульсатор, L , м ³ /ч	Частота пульсатора, ν Гц
V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
1	12,38	0,00001	4	21-25	25-30	0,005	1-10	104	13
5	11,49	0,00001	4	21-25	25-30	0,005	1-10	104	13
10	9,83	0,00001	4	21-25	25-30	0,005	1-10	104	13
15	8,28	0,00001	4	21-25	25-30	0,005	1-10	104	13
...

Исходный набор данных, представленный в таблице 8, 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 $V1 \dots V10$, значение натурального логарифма фактического значения концентрации являлось конечным значением функции. Поскольку в массиве данных присутствуют параметры эксперимента, представленные в диапазонах, эти параметры были заведомо исключены из выборки в силу своей постоянности (нулевая дисперсия).

Также для определения влияния различных параметров на предсказуемую концентрацию был проведен SHAP-анализ, основанный на теории игр [141]. При этом видно наибольшее влияние оказывают параметры: время осаждения, диаметр форсунки, расход воздуха на пульсаторе и частота пульсаций. Проведённый (на полном массиве данных) SHAP-анализ, подтверждающий влияние параметров, представлен на рисунке 52.

Согласно проведённому анализу (рис. 52), были выявлены параметры, оказывающие максимальное влияние на математическую модель. Массив данных был изменен в соответствии с влияющими параметрами. Этими параметрами являются:

- Время, t , с;
- Концентрация, C , мг/м³;
- Диаметр форсунки, D , м;
- Расход воздуха, пульсатор, L , м³/ч;
- Частота пульсатора, ν Гц.

Пример массива данных, использующийся в разработке математической модели представлен в таблице 9.

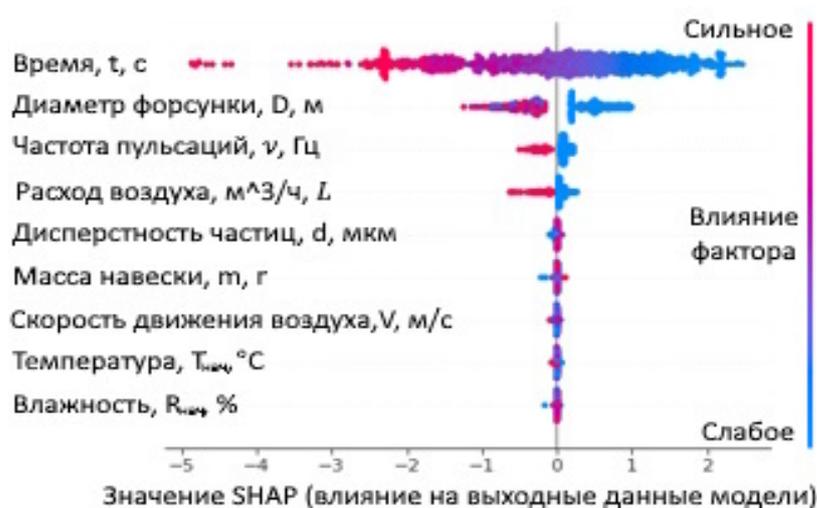


Рисунок 52 – Результаты проведённого SHAP анализа полного массива данных по осаждению

Скорректированный набор данных, представленный в таблице 9, логарифмировали и также 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 $V1 \dots V5$, фактическое значение концентрации являлось конечным значением функции. Основной задачей данной части работы являлось

создание эффективных моделей машинного обучения для описания зависимостей между параметрами V1 и V2 от набора независимых переменных V3, V4, V5.

Таблица 9 - Пример набора данных эксперимента по осаждению аэрозоля комбинированным методом с учетом проведенного SHAP-анализа.

Время, t , с	Концентрация C , мг/м ³	Диаметр форсунки, D , мкм	Частота, ν , Гц	Расход воздуха, пульсатор, L , м ³ /ч
V1	V2	V3	V4	V5
1	12,38	10	13	104
5	11,49	10	13	104
10	9,83	10	13	104
15	8,28	10	13	104
...

Полученные результаты моделирования приведены ниже (рис. 53).
Тренировочный набор: СКО: 0.069; $R^2 = 0.998$; Тестовый набор: СКО: 0.174; $R^2 = 0.987$

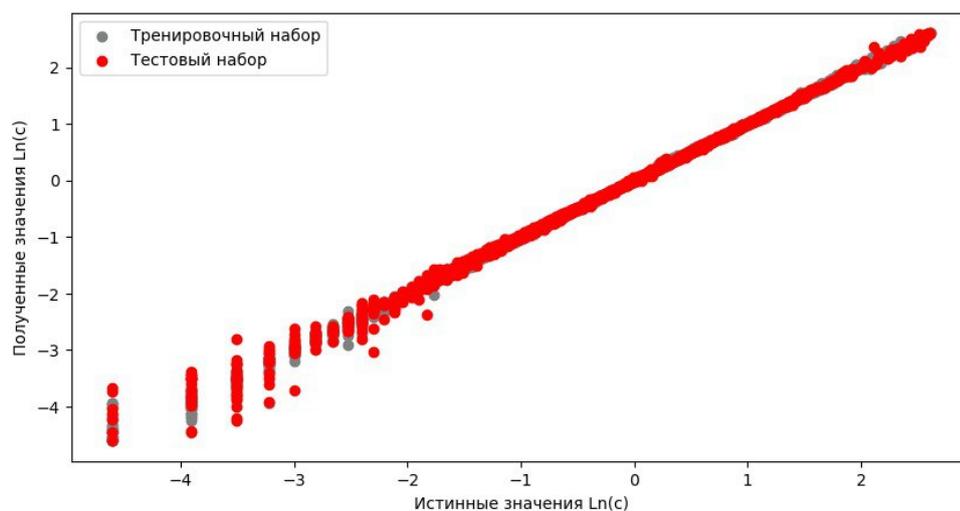


Рисунок 53 - Зависимость полученных от истинных (измеренных) логарифмических значений концентрации пыли при использовании машинного обучения для полной выборки данных

Согласно рисунку 53, линейность функции наблюдается в зоне $\ln(C)$ от -2 до 2, что соответствует диапазону концентрации от 0,13–7,4 мг/м³. В этом диапазоне модель машинного обучения максимально точно соответствует экспериментальным данным. Хорошая согласованность также наблюдётся при моделировании. На рисунке 54 представлены результаты моделирования процесса пылеосаждения комбинированным методом при помощи модели машинного обучения и экспериментальных данных по осаждению.

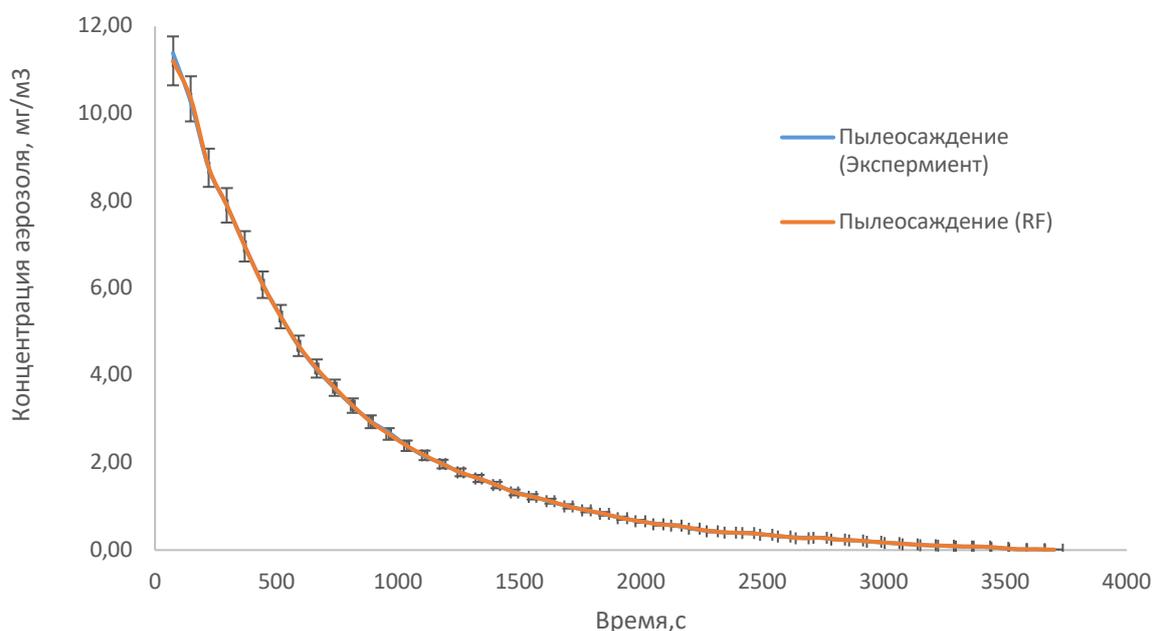


Рисунок 54 - Зависимость концентрации аэрозоля от времени при данных эксперимента и модели машинного обучения

Как видно на рисунке 54, математическая модель, полученная при помощи машинного обучения, наиболее точно согласуется с моделью. А наибольшее количество предсказанных моделью машинного обучения данных находятся в пределах погрешности (не более 1%). Для удобства пользования моделью осаждения пыли ППЖК, разработанной с помощью машинного обучения, было разработано программное обеспечение (ПО). Пример работы программы представлен на рисунке 55.

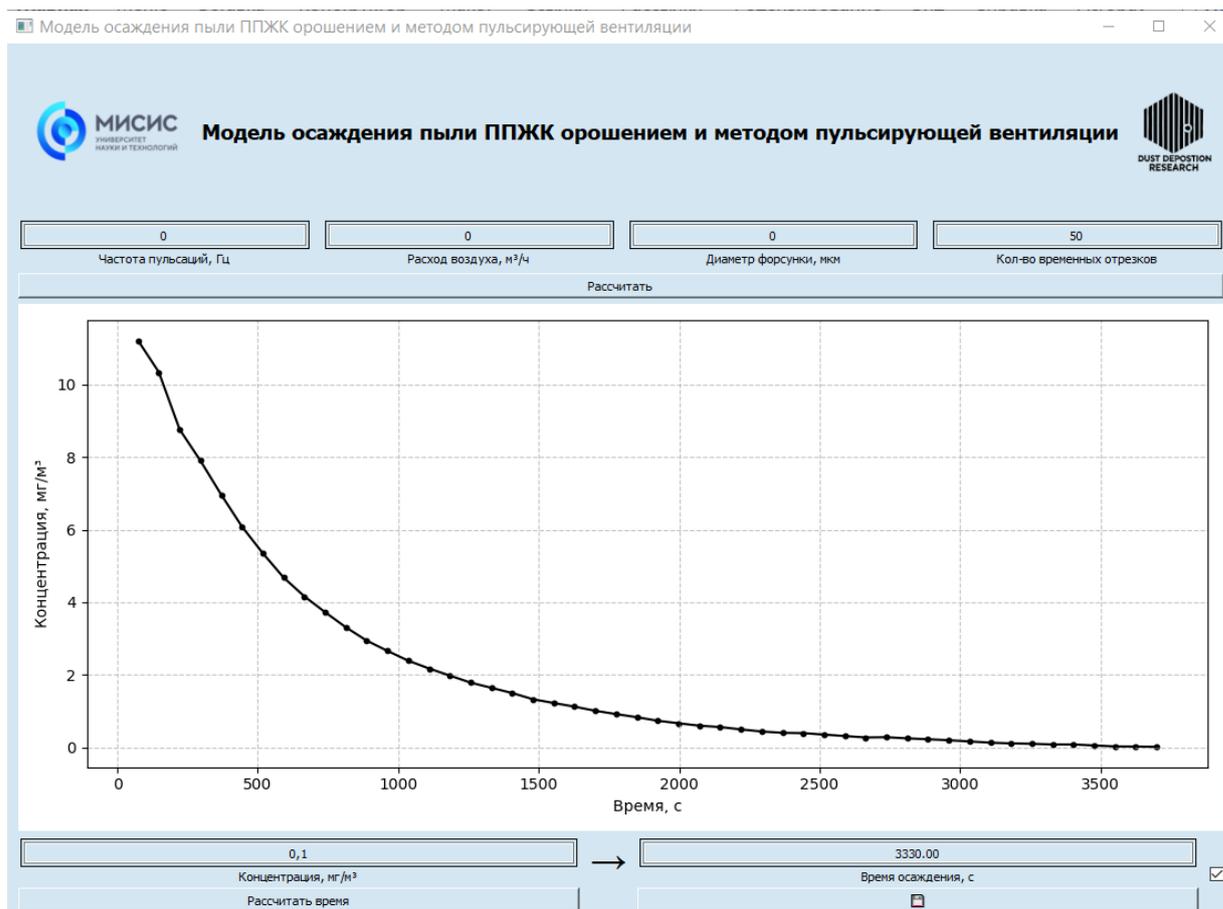


Рисунок 55 – Пример работы ПО «Модель осаждения пыли ППЖК орошением и методом пульсирующей вентиляции»

Представленная программа является специализированным программным обеспечением, разработанным для моделирования процесса осаждения пыли ППЖК методом орошения с применением метода пульсирующей вентиляции. Цель данного программного продукта — расчет изменения концентрации пыли во времени под действием аэрогидродинамических факторов, связанных с параметрами воздушного потока, пульсирующего устройства и характеристиками системы орошения.

Программа имеет графический интерфейс пользователя, позволяющий задавать исходные параметры, критически влияющие на эффективность пылеподавления: частота пульсаций (в Гц), расход воздуха на пульсаторе (в м³/ч), диаметр форсунки (в мкм), а также количество временных отрезков, используемых для дискретизации временного интервала расчёта. На основе введённых данных

осуществляется численное моделирование изменения концентрации пыли (в $\text{мг}/\text{м}^3$) во времени (в секундах), что визуализируется в виде графика на координатной плоскости. График позволяет отслеживать динамику осаждения пыли, демонстрируя экспоненциальный характер снижения концентрации аэрозольной фазы. Блок-схема алгоритма работы ПО «Модель осаждения пыли ППЖК орошением и методом пульсирующей вентиляции» представлена на рисунке 56.

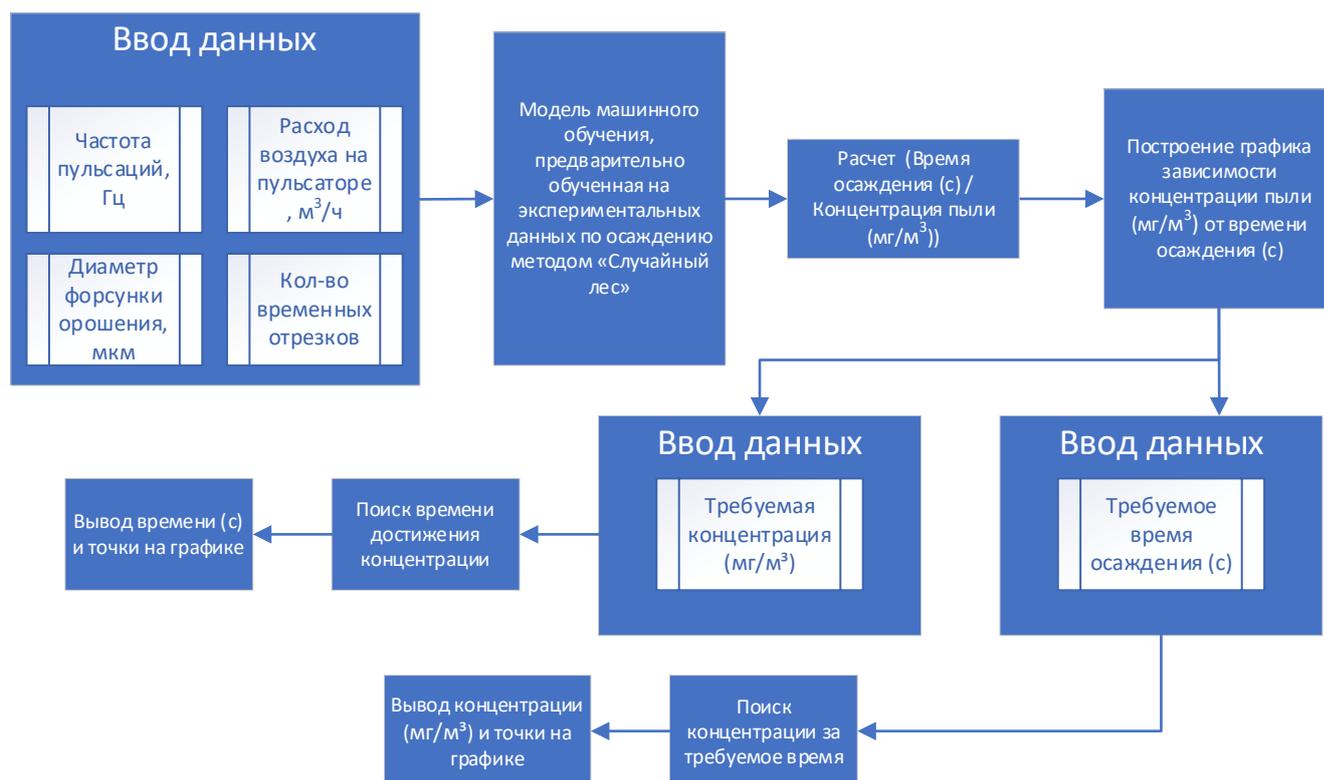


Рисунок 56 – Блок-схема алгоритма работы ПО «Модель осаждения пыли ППЖК орошением и методом пульсирующей вентиляции»

Кроме того, программа оснащена функцией прямого и обратного расчёта: пользователь может либо задать начальную концентрацию и получить расчётное время осаждения до целевого уровня, либо задать максимальное допустимое время и определить, до какого уровня может быть снижена концентрация в заданных условиях. Результаты проведенного моделирования при помощи данной модели приведены на рисунке 57. При сравнении рисунков 41 и 57 видно, что модель

максимально точно производит расчеты по времени осаждения пыли при применении комбинированного метода пылеосаждения орошением.

Также проводилось моделирование процесса осаждения пыли ППЖК комбинированным методом с различными частотами (1, 3, 7, 10, 13 и 20 Гц). Результаты моделирования приведены на рисунке 58. Исходя из анализа зависимостей представленных на рисунке 35 и 58 видно, что модель отражает влияние частоты пульсирующего устройства на скорость осаждения пыли. Время осаждения при использовании частот 1, 3, 7, 10 и 20 Гц лежат в диапазоне от 1600 до 1900 с, что соответствует натурным экспериментам.

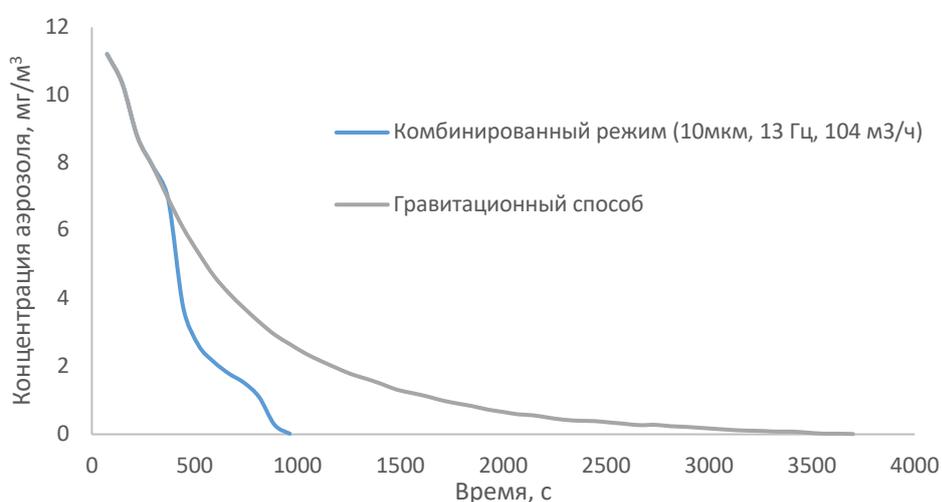


Рисунок 57 – Результаты моделирования процесса осаждения пыли при пылеосаждении и осаждении комбинированным методом в разработанном ПО

Помимо того, что модель машинного обучения учитывает влияние орошения и пульсирующей вентиляции, она также учитывает и расход воздуха, подаваемого на пульсатор. Результаты численного моделирования процесса осаждения пыли пылевоздушной смеси в пылеосадительной камере (ППЖК) с использованием комбинированного метода и варьированием расхода воздуха представлены на рисунке 59. В рамках моделирования проводилось поэтапное изменение параметра воздушного потока с целью определения его влияния на скорость снижения концентрации пыли. Данный параметр является одним из ключевых в системе

пульсирующего орошения, так как от него напрямую зависят аэрогидродинамические характеристики потока, в том числе интенсивность перемешивания и уровень турбулентности, способствующий ускоренному осаждению дисперсной фазы.

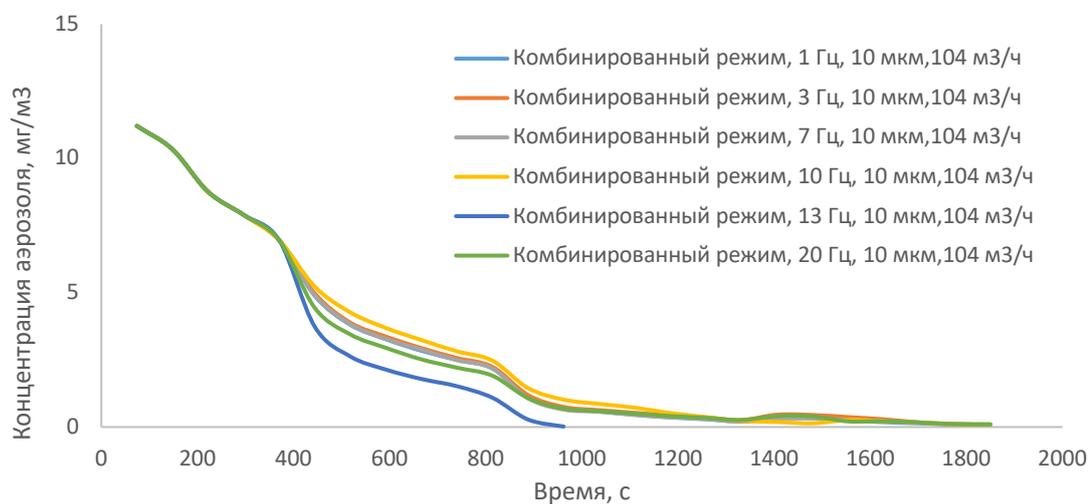


Рисунок 58 - Результаты моделирования процесса осаждения пыли комбинированным методом при различных частотах пульсатора в разработанном ПО

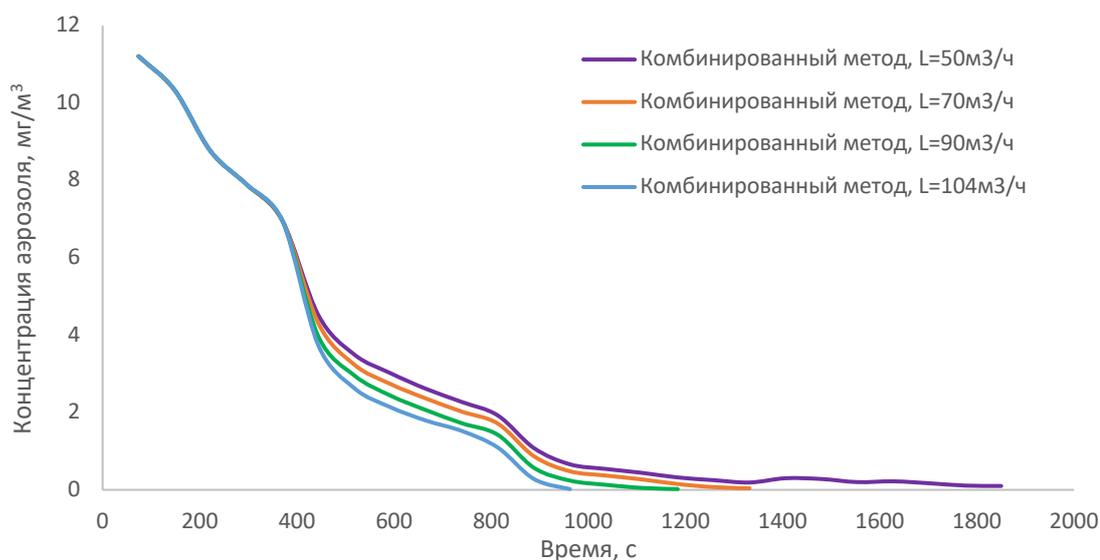


Рисунок 59 - Результаты моделирования процесса осаждения пыли комбинированным методом при различных расходах воздуха на пульсаторе в разработанном ПО

Анализ результатов, полученных при помощи модели, в сопоставлении с экспериментальными зависимостями, приведёнными на рисунках 40 и 59, позволяет сделать вывод о высокой степени корреляции между расчётными и натурными данными. Как видно из графиков, наиболее эффективное осаждение пыли достигается при расходе воздуха, близком к $104 \text{ м}^3/\text{ч}$. Именно в этой области наблюдается наименьшее время достижения граничного уровня концентрации пыли, что также подтверждается данными полунатурных испытаний. Таким образом, модель адекватно отражает влияние воздушного расхода на эффективность пылеподавления при реализации комбинированного метода.

Экспериментальные данные, использованные для обучения данной модели машинного обучения, были получены в результате серии натуральных и лабораторных испытаний по осаждению пыли ППЖК с применением метода пульсирующей вентиляции и системы орошения. Эти данные охватывают достаточный диапазон технологических параметров, включая варьируемую частоту пульсаций (от 1 до 20 Гц), расход воздуха на пульсаторе (от 50 до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$), а также диаметр форсунок (от 10 до 20 мкм). Благодаря тщательной калибровке и предварительной очистке данных, модель получила устойчивые зависимости, отражающие как кинетику осаждения пыли, так и влияние параметров внешней среды на скорость снижения концентрации.

На основании анализа полученного массива экспериментальных данных были установлены границы применимости модели машинного обучения. Во-первых, модель адекватно описывает процесс осаждения при начальной концентрации пыли в диапазоне от 1 до $10 \text{ мг}/\text{м}^3$. За пределами этих значений точность прогноза существенно снижается вследствие нелинейности процессов агрегации и турбулентной дисперсии, не полностью охваченных обучающей выборкой. Во-вторых, достоверность модели сохраняется при времени осаждения более 1 часа (3700 секунд), что соответствует эксплуатационным режимам стандартных вентиляционно-орошающих систем в закрытых производственных пространствах.

Таким образом, построенная модель машинного обучения обладает высокой прогностической способностью в пределах заданных параметров. Выход за пределы этих границ требует либо пересмотра модели с учетом новых данных, либо внедрения гибридных подходов, комбинирующих эмпирические зависимости с физико-математическим моделированием аэрозольных процессов в условиях переменного воздушного потока и динамики орошения. Прогнозирование осуществляется с использованием обученной модели машинного обучения, способной учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами воздушного потока, характеристиками капельного орошения и динамикой аэрозольной фазы. Несмотря на отдельные погрешности в расчётах концентрации, модель машинного обучения демонстрирует высокую точность в определении времени осаждения пылевых частиц, что особенно важно при анализе эффективности систем пылеподавления. Сама же программа представляет собой универсальный инженерный инструмент для оценки эффективности систем пылеподавления, работающих на принципе пульсирующей вентиляции, и может быть использована как в научных исследованиях, так и при проектировании вентиляционно-орошающих установок на объектах горно-металлургического комплекса.

3.2 Разработка математической модели осаждения аэрозоля математико-статистическими методами обработки экспериментальных данных

3.2.1 Обработка экспериментальных данных по пылеосаждению комбинированным методом путем математико-статистических преобразований

Для определения взаимосвязи концентрации пылеосаждения в зависимости от диаметра форсунки, частоты и уровня расхода воздуха нами принят метод множественной корреляции данных, полученных на основе проведения эксперимента [146]:

- время $1 \div 120$ с – V_1 ;
- концентрация $4,06 \div 13,60$ мг/м³ – V_2 ;
- форсунка $10 \div 20$ мкм ($0,00001 \div 0,00002$ м) – V_3 ;
- частота $1 \div 20$ Гц – V_4 ;
- расход $50-104$ м³/ч – V_5 .

Эксперимент проведен с различными вариантами комбинации диаметра форсунки (V_3), частоты колебания (V_4) и расхода воздуха (V_5), далее позиция по условиям пылеосаждения N_{li} . Всего различных вариантов (позиций) – 15. Каждая позиция во временном изменении оценивалась по 25 (N_{ij}) равномерным интервалами времени $1 \div 120$ с. (V_1). Для каждой позиции N_{li} соответствует определенный уровень концентрации пылеосаждения (V_{2ij}), которые представлены в табл 10. Для построения вариационного ряда определяем ширину интервала ряда распределения, h . Приближенное значение h по эмпирической формуле Стерджесса по всем 15 позициям эксперимента рассчитывалось по следующей формуле [146]:

$$h = \left(V_{1N_{1i}max} - V_{1N_{1i}min} \right) / \left(1 + 3.2 \log N_{ij} \right) \quad (9)$$

где: $V_{1N_{1i}max}$ – наибольшее значение варианта в данном ряду (позиции),

$V_{1N_{1i}min}$ – наименьшее значение варианта в данном ряду (позиции),

N_{ij} – общее количество наблюдений в данном ряду (объем выборки).

Ширина интервала ряда распределения h для каждой i -й позиции приведена в столбце 30 таблицы 10. Вклад факторов, определяющих процесс пылеосаждения — диаметра форсунки (V_3), частоты колебаний (V_4), и расхода воздуха (V_5) — различен (имеет разный вес). Для количественной оценки вклада рассчитывают частные коэффициенты корреляции и на основе множественной корреляции определяют форму и тесноту связи между тремя показателями при фиксированном значении четвертого, принимая для каждой из 15 позиций по 25 замерам среднеинтервальную концентрацию (V_{1cp}) по следующей формуле [147, 148]:

$$\overline{V_{1cp}} = \frac{V_{1i} + V_{2i} + V_{3i} + \dots + V_{Ni}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} V_{ji}}{N} \quad (10)$$

где: $\overline{V_{1cp}}$ – среднеинтервальная концентрация, мг/м³;

V_{ji} – концентрация N_{ji} соответствующей позиции, мг/м³;

Таблица 10 – Результаты экспериментальных данных сведенные в единую таблицу для математико-статистической обработки

Позиции N_{ij}	Условия пылеосаждения			Эксперимент N_{ij} уровень концентрации пылеосаждения V_{ij} мг/м ³												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Диаметр форсунки, мкм V3	Частота, Гц	Расход, V5	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.
1.Самоосаждение пыли	0	0	0	13,43	13,32	13,06	13,01	12,72	12,71	12,63	12,56	12,31	12,23	12,06	12,09	11,83
2.Осаждение орошением	10	0	0	13,46	12,36	11,46	10,45	9,87	9,27	8,36	7,59	7,16	6,83	6,47	6,31	6,18
3.-«-	15	0	0	13,18	12,89	12,59	12,29	12,00	11,70	11,41	11,11	10,82	10,52	10,22	9,93	9,63
4.-«-	20	0	0	13,21	12,80	12,39	11,98	11,57	11,16	10,75	10,33	9,92	9,51	9,10	8,69	8,28
5.Комби.метод	10	13	104	12,38	11,49	9,83	8,28	7,11	6,71	6,38	6,12	5,82	5,71	5,58	5,41	5,23
6.-«-	15	13	104	13,17	11,65	9,77	9,28	8,21	7,62	7,47	7,13	7,07	6,94	6,88	6,57	6,47
7.-«-	20	13	104	13,49	13,01	12,52	12,05	11,59	11,11	10,62	10,16	9,68	9,21	8,74	8,27	7,78
8.-«-	10	1	104	13,60	13,20	12,60	11,50	9,38	7,77	7,54	7,06	6,87	6,45	6,20	6,25	6,14
9.-«-	10	3	104	13,30	12,90	12,50	12,10	11,00	9,21	8,49	8,14	7,55	7,17	6,82	6,78	6,71
10.-«-	10	7	104	13,50	12,80	12,60	12,10	11,60	9,59	8,12	7,90	7,55	7,03	6,59	6,33	6,07
11.-«-	10	10	104	13,60	13,20	12,85	12,40	11,90	11,42	11,09	10,52	9,67	9,25	8,73	8,49	8,17
12.-«-	10	20	104	13,20	12,90	12,20	11,60	11,00	10,45	9,59	8,80	8,45	8,20	7,99	7,65	7,56
13.-«-	10	13	50	13,27	12,76	12,51	9,88	8,58	8,49	8,12	7,60	7,37	6,88	6,73	6,27	5,96
14.-«-	10	13	70	13,01	12,41	11,93	11,46	11,10	10,93	10,60	10,21	9,90	9,58	9,33	8,97	8,80
15.-«-	10	13	90	13,42	12,85	12,29	11,87	11,39	10,75	10,24	9,77	9,23	8,78	8,29	7,78	7,37

Позиции	Эксперимент N_{ij} , уровень концентрации пылеосаждения V_{ij} , мг/м ³												Ширина интервала ряда распределения, h	Концентрация, мг/м ³		
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		V_{1k}		
	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	$V_{1N_{1i}ma}$	$V_{1N_{1i}mix}$	V_{1cp}	
	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.
1	11,67	11,57	11,39	11,21	11,30	11,05	11,21	11,11	11,07	10,98	10,87	10,66	0,505	13,43	10,66	11,92
2	6,02	5,79	5,55	5,38	5,19	5,12	5,02	4,92	4,82	4,74	4,68	4,65	1,610	13,46	4,65	7,11
3	9,39	9,11	8,63	8,35	8,19	7,93	7,78	7,62	7,46	7,32	7,22	7,18	1,096	13,18	7,18	9,78
4	7,87	7,45	7,14	6,93	6,74	6,42	6,34	6,18	6,09	6,02	5,84	5,68	1,376	13,21	5,68	8,74
5	5,11	5,02	4,89	4,79	4,66	4,58	4,47	4,37	4,30	4,18	4,13	4,06	1,520	12,38	4,06	6,02
6	6,46	6,09	6,06	5,94	5,70	5,67	5,62	5,38	5,31	5,27	5,13	5,00	1,494	13,17	5,00	7,03
7	7,37	6,83	6,40	6,03	5,69	5,43	5,27	5,21	5,04	4,94	4,98	4,86	1,575	13,49	4,86	8,25
8	6,24	6,18	6,15	6,11	6,18	5,96	5,98	5,91	5,80	5,67	5,64	5,51	1,478	13,60	5,51	7,44
9	6,70	6,63	6,60	6,50	6,49	6,40	6,28	6,39	6,26	6,17	6,00	5,95	1,343	13,30	5,95	7,96
10	5,93	5,95	5,93	5,89	5,84	5,76	5,65	5,64	5,47	5,47	5,39	5,30	1,498	13,50	5,30	7,60
11	8,20	8,06	7,95	7,85	7,72	7,67	7,65	7,51	7,53	7,42	7,20	7,14	1,180	13,60	7,14	9,33
12	7,40	7,24	7,19	7,10	6,95	6,84	6,80	6,65	6,55	6,43	6,26	6,16	1,286	13,20	6,16	8,45
13	5,83	5,70	5,40	5,31	5,22	5,08	5,05	5,15	5,13	5,00	5,06	4,99	1,512	13,27	4,99	7,09
14	8,47	8,32	8,13	8,07	7,96	7,71	7,49	7,17	6,96	6,59	6,28	6,01	1,278	13,01	6,01	9,10
15	6,87	6,52	6,10	5,83	5,53	5,25	5,01	4,86	4,74	4,48	4,35	4,27	1,673	13,42	4,27	7,91

Определение зависимости концентрации уровня запыленности в зависимости от диаметра форсунки, частоты и уровня расхода воздуха.

Таблица 11 – Значение среднеинтервальной концентрации для каждого из проведенных экспериментов

№ позиции по условиям пылеосаждения, N_{li}	Признак			
	Среднеинтервальная концентрация, мг/м ³ V_{1cp}	Диаметр форсунки, мкм V_2	Частота, Гц V_3	Расход, м ³ /ч V_4
1.	11,92	0	0	0
2.	7,11	10	0	0
3.	9,78	15	0	0
4.	8,74	20	0	0
5.	6,02	10	13	104
6.	7,03	15	13	104
7.	8,25	20	13	104
8.	7,44	10	1	104
9.	7,96	10	3	104
10.	7,6	10	7	104
11.	9,33	10	10	104
12.	8,45	10	20	104
13.	7,09	10	13	50
14.	9,1	10	13	70
15.	7,91	10	13	90

Результаты расчетов сведем в расчетную таблицу (табл. 12) с целью получения данных для дальнейшего расчета [149, 150, 151].

Таблица 12 – Расчетная таблица критериев для расчета

V_{1cp}	V_2	V_3	V_4	V_{1cp}^2	V_2^2	V_3^2	V_4^2	$V_{1cp} V_2$	$V_{1cp} V_3$	$V_{1cp} V_4$
11,92	0	0	0	142,09	0	0	0	0,00	0,00	0,00
7,11	10	0	0	50,55	100	0	0	71,10	0,00	0,00
9,78	15	0	0	95,65	225	0	0	146,70	0,00	0,00
8,74	20	0	0	76,39	400	0	0	174,80	0,00	0,00
6,02	10	13	104	36,24	100	169	0	60,20	78,26	626,08
7,03	15	13	104	49,42	225	169	10816	105,45	91,39	731,12

V_{1cp}	V_2	V_3	V_4	V_{1cp}^2	V_2^2	V_3^2	V_4^2	$V_{1cp} V_2$	$V_{1cp} V_3$	$V_{1cp} V_4$
8,25	20	13	104	68,06	400	169	10816	165,00	107,25	858,00
7,44	10	1	104	55,35	100	1	10816	74,40	7,44	773,76
7,96	10	3	104	63,36	100	9	10816	79,60	23,88	827,84
7,6	10	7	104	57,76	100	49	10816	76,00	53,20	790,40
9,33	10	10	104	87,05	100	100	10816	93,30	93,30	970,32
8,45	10	20	104	71,40	100	400	10816	84,50	169,00	878,80
7,09	10	13	50	50,27	100	169	10816	70,90	92,17	354,50
9,1	10	13	70	82,81	100	169	2500	91,00	118,30	637,00
7,91	10	13	90	62,57	100	169	4900	79,10	102,83	711,90
$\Sigma V_{1cp} = 123,73$	$\Sigma V_2 = 170$	$\Sigma V_3 = 119$	$\Sigma V_4 = 1042$	$\Sigma V_{1cp}^2 = 1048,97$	$\Sigma V_2^2 = 2250$	$\Sigma V_3^2 = 1573$	$\Sigma V_4^2 = 93928$	$\Sigma V_{1cp} V_2 = 1372,05$	$\Sigma V_{1cp} V_3 = 937,02$	$\Sigma V_{1cp} V_4 = 8159,72$

Вычисляем парные коэффициенты корреляции [152]:

Пылеосаждение ↔ диаметр форсунки:

$$r_{V_{1cp}V_2} = \frac{\Sigma V_{1cp}V_2 - \frac{(\Sigma V_{1cp} * \Sigma V_2)}{N_1}}{\sqrt{\left(\Sigma V_{1cp}^2 - \frac{(\Sigma V_{1cp})^2}{N_1}\right) * \left(\Sigma V_2^2 - \frac{(\Sigma V_2)^2}{N_1}\right)}} = \frac{1372,05 - \left(\frac{123,73 * 170}{15}\right)}{\sqrt{\left(1048,97 - \frac{1048,97}{15}\right) * \left(2250 - \frac{2250}{15}\right)}} = \frac{-30,22}{1433,87} = -0,021$$

Пылеосаждение ↔ частота:

$$r_{V_{1cp}V_3} = \frac{\sum V_{1cp}V_3 - \frac{(\sum V_{1cp} * \sum V_3)}{N_1}}{\sqrt{\left(\sum V_{1cp}^2 - \frac{(\sum V_{1cp})^2}{N_1}\right) * \left(\sum V_3^2 - \frac{(\sum V_3)^2}{N_1}\right)}} = \frac{937,02 - \left(\frac{123,73 * 119}{15}\right)}{\sqrt{\left(1048,97 - \frac{1048,97}{15}\right) * \left(1573 - \frac{1573}{15}\right)}} = \frac{-44,57}{1198,9} = -0,037$$

Пылеосаждение ↔ расход воздуха:

$$r_{V_{1cp}V_4} = \frac{\sum V_{1cp}V_4 - \frac{(\sum V_{1cp} * \sum V_4)}{N_1}}{\sqrt{\left(\sum V_{1cp}^2 - \frac{(\sum V_{1cp})^2}{N_1}\right) * \left(\sum V_4^2 - \frac{(\sum V_4)^2}{N_1}\right)}} = \frac{8159,72 - \left(\frac{123,73 * 1042}{15}\right)}{\sqrt{\left(1048,97 - \frac{1048,97}{15}\right) * \left(93928 - \frac{93928}{15}\right)}} = \frac{-435,39}{1433,87} = -0,047$$

Вычисление частных коэффициентов корреляции:

Пылеосаждение ↔ диаметр форсунки ↔ частота:

$$r_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3} = \frac{r_{V_{1cp}V_2} - r_{V_{1cp}V_3} * r_{V_{1cp}V_4}}{\sqrt{\left(1 - r_{V_{1cp}V_3}^2\right) * \left(1 - r_{V_{1cp}V_4}^2\right)}} = \frac{-0,021 - (-0,037) * (-0,047)}{\sqrt{(1 - 0,037^2) * (1 - 0,047^2)}} = \frac{-0,019}{0,998} = -0,0193$$

Пылеосаждение ↔ частота ↔ расход воздуха:

$$r_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4} = \frac{r_{V_{1cp}V_3} - r_{V_{1cp}V_2} * r_{V_{1cp}V_4}}{\sqrt{\left(1 - r_{V_{1cp}V_2}^2\right) * \left(1 - r_{V_{1cp}V_4}^2\right)}} = \frac{-0,037 - (-0,021) * (-0,047)}{\sqrt{(1 - 0,021^2) * (1 - 0,047^2)}} = \frac{-0,038}{0,999} = -0,038$$

Пылеосаждение ↔ расход воздуха ↔ диаметр форсунки:

$$r_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2} = \frac{r_{V_{1cp}V_4} - r_{V_{1cp}V_2} * r_{V_{1cp}V_3}}{\sqrt{(1 - r_{V_{1cp}V_2}^2) * (1 - r_{V_{1cp}V_3}^2)}} = \frac{-0.047 - (-0.021) * (-0.037)}{\sqrt{(1 - 0.021^2) * (1 - 0.037^2)}} \\ = \frac{-0.048}{0.998} = -0.048$$

Вычисление ошибки частных коэффициентов корреляции [153]:

Пылеосаждение ↔ диаметр форсунки ↔ частота:

$$S_{r_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3}} = \sqrt{\frac{1 - r_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3}^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0.0193^2}{15 - 2}} = \sqrt{\frac{0.9996}{13}} = 0.2773$$

Пылеосаждение ↔ частота ↔ расход воздуха:

$$S_{r_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4}} = \sqrt{\frac{1 - r_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4}^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0.038^2}{15 - 2}} = \sqrt{\frac{0.9985}{13}} = 0.2772$$

Пылеосаждение ↔ расход воздуха ↔ диаметр форсунки:

$$S_{r_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2}} = \sqrt{\frac{1 - r_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2}^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0.048^2}{15 - 2}} = \sqrt{\frac{0.9977}{13}} = 0.2770$$

Определение критерия значимости частных коэффициентов корреляции и их существенность:

Диаметр форсунки:

$$t_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3} = \frac{r_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3}}{S_{r_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3}}} = \frac{0.0193}{0.02773} = 0.07$$

Частота:

$$t_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4} = \frac{r_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4}}{S_{r_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4}}} = \frac{0.038}{0.02772} = 0.137$$

Расход воздуха:

$$t_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2} = \frac{r_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2}}{S_{r_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2}}} = \frac{0.0193}{0.02773} = 0.173$$

На основании расчетов установлено, что наибольшей весомостью при пылеосаждении обладает показатель, определяющий расход воздуха (0,173), следующий по значимости – частота (0,137) и наиболее низкая весомость с величиной в 0,07 определено в отношении диаметра форсунки. Данные величины будем использовать в качестве весомостей показателей пылеосаждения.

Общая формула для расчета качественного уровня пылеосаждения с учетом значимостей в процесс пылеосаждения диаметра форсунки, частоты и расхода воздуха будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{кач}} = \sum_N^{N_{ij}} \left(t_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) \right) + \sum_N^{N_{ij}} \left(t_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) \right) + \sum_N^{N_{ij}} \left(t_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) \right)$$

Так как оценку качества пылеосаждения проводим отдельно для каждого случая с определенным набором показателей, вышеприведенная формула примет следующий вид:

$$V_{\text{кач}} = \left(t_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) * k_1 \right) + \left(t_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) * k_2 \right) + \left(t_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2} * \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) * k_3 \right)$$

Коэффициенты $t_{V_{1cp}V_2V_{1cp}V_3}$, $t_{V_{1cp}V_3V_{1cp}V_4}$, $t_{V_{1cp}V_4V_{1cp}V_2}$ заменим на расчетные значения частных коэффициентов корреляции (коэффициенты значимости).

$$V_{\text{кач}} = 0.07k_1 \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) + 0.137k_2 \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) + 0.173k_3 \left(\frac{V_{ij}}{V_{\text{баз}}} \right) \quad (11)$$

Где: $V_{\text{кач}}$ - качество пылеосаждения;

0,07, 0,137, 0,173 – коэффициенты значимости соответственно от диаметра форсунки, частоты и расхода воздуха;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, определяющие параметры соответственно диаметр форсунки, частоту и расход воздуха;

V_{ij} - среднеинтервальная величина пылеосаждения, мг/м³;

$V_{баз}$ – базовая величина, равная ПДК, мг/м³ (В качестве $V_{баз}$, примем ПДК=0,3 мг/м³).

Данное выражение не показывает величину изменчивости показателей V_2, V_3, V_4 , представленных в табл.11. Данные величины по всем показателям имеют разброс от 1 до 104. Все эти данные, с целью исключения большого разброса разделим на 10^{-3} (табл. 13):

Таблица 13 – Сводная таблица рассчитанных коэффициентов показателей для используемых параметров

Диаметр форсунки,		Частота,		Расход,	
мкм	k_1	Гц	k_2	м ³ /ч	k_3
0	0	0	0	0	0
10	0,01	1	0,001	50	0,05
15	0,015	3	0,003	70	0,07
20	0,020	7	0,007	90	0,09
0	0	10	0,01	104	0,104
0	0	13	0,013	0	0
0	0	20	0,02	0	0

Для примера проведем расчет для среднеинтервальной величины V_{1cp} по 15 позициям (таб. 14):

На основе расчетов установлено, что наибольший вес в процесс пылеосаждения приносит расход воздуха, а наилучшая оценка пылеосаждения достигается при следующих условиях:

- диаметр форсунки 10 мкм;
- частота колебаний 10 Гц;
- расходе воздуха 104 мг/м³.

Таблица 14 – Сводная таблица рассчитанных среднеинтервальных величин для полного набора экспериментальных данных

№ позиции по условиям пылеосаждения, N_{ii}	Показатели				Коэффициенты показателей			Общая оценка при различных уровнях ПДК, $V_{\text{кач}}$				
	Среднеинтервальная концентрация, $\text{мг}/\text{м}^3$, $V_{1\text{cp}}$	Диаметр форсунки, мкм , V_2	Частота, Гц V_3	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$, V_4	k_1	k_2	k_3	0,3	2	4	6	8
1.	11,92	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2.	7,11	10	0	0	0,01	0	0	0,017	0,002	0,001	0,001	0,001
3.	9,78	15	0	0	0,015	0	0	0,034	0,005	0,003	0,002	0,001
4.	8,74	20	0	0	0,02	0	0	0,041	0,006	0,003	0,002	0,002
5.	6,02	10	13	104	0,01	0,013	0,104	0,411	0,062	0,031	0,021	0,015
6.	7,03	15	13	104	0,015	0,013	0,104	0,488	0,073	0,037	0,024	0,018
7.	8,25	20	13	104	0,02	0,013	0,104	0,582	0,087	0,044	0,029	0,022
8.	7,44	10	1	104	0,01	0,001	0,104	0,467	0,070	0,035	0,023	0,018
9.	7,96	10	3	104	0,01	0,003	0,104	0,507	0,076	0,038	0,025	0,019
10.	7,6	10	7	104	0,01	0,007	0,104	0,498	0,075	0,037	0,025	0,019
11.	9,33	10	10	104	0,01	0,01	0,104	0,624	0,094	0,047	0,031	0,023
12.	8,45	10	20	104	0,01	0,02	0,104	0,604	0,091	0,045	0,030	0,023
13.	7,09	10	13	50	0,01	0,013	0,05	0,263	0,039	0,020	0,013	0,010
14.	9,1	10	13	70	0,01	0,013	0,07	0,443	0,066	0,033	0,022	0,017
15.	7,91	10	13	90	0,01	0,013	0,09	0,476	0,071	0,036	0,024	0,018

Аналогичным образом можно рассчитать общую оценку качества конкретно для любого условия пылеосаждения в определенный период времени. Рассмотрим следующее соотношение для наилучшей позиции № 11 с уровнем среднеинтервальной концентрации $9,33 \text{ мг}/\text{м}^3$ с учетом изменения диаметра форсунки от 0,01 до 0,025 мм при частоте колебаний от 1 до 20 Гц и расхода воздуха

50 до 104 мг/м³ (табл. 15). Для наглядности и анализа сведем результаты расчета оценок в графики приведенные на рисунках 60 – 63 [154, 155]:

Таблица 15 – Сводная таблица оценок при среднеинтервальной концентрации 9,33 мг/м³ с соответствующими частотой/объемом воздуха

Диаметр форсунки, мкм	Оценка при среднеинтервальной концентрации 9,33 мг/м ³ с соответствующими частотой/объемом воздуха (ПДК=0,3 мг/м ³)					
	0,001/0,05	0,003/0,05	0,007/0,05	0,01/0,05	0,013/0,05	0,02/0,05
10	0,295	0,304	0,321	0,333	0,346	0,376
15	0,306	0,314	0,331	0,344	0,357	0,387
20	0,317	0,325	0,342	0,355	0,368	0,398
25	0,328	0,336	0,353	0,366	0,379	0,409
	0,001/0,07	0,003/0,07	0,007/0,07	0,01/0,07	0,013/0,07	0,02/0,07
10	0,403	0,411	0,428	0,441	0,454	0,484
15	0,414	0,422	0,439	0,452	0,465	0,494
20	0,424	0,433	0,450	0,463	0,476	0,505
25	0,435	0,444	0,461	0,474	0,486	0,516
	0,001/0,09	0,003/0,09	0,007/0,09	0,01/0,09	0,013/0,09	0,02/0,09
10	0,510	0,519	0,536	0,549	0,561	0,591
15	0,521	0,530	0,547	0,559	0,572	0,602
20	0,532	0,541	0,558	0,570	0,583	0,613
25	0,543	0,551	0,568	0,581	0,594	0,624
	0,001/0,104	0,003/0,104	0,007/0,104	0,01/0,104	0,013/0,104	0,02/0,104
10	0,586	0,594	0,611	0,624	0,637	0,667
15	0,596	0,605	0,622	0,635	0,648	0,677
20	0,607	0,616	0,633	0,646	0,658	0,688
25	0,618	0,627	0,644	0,657	0,669	0,699

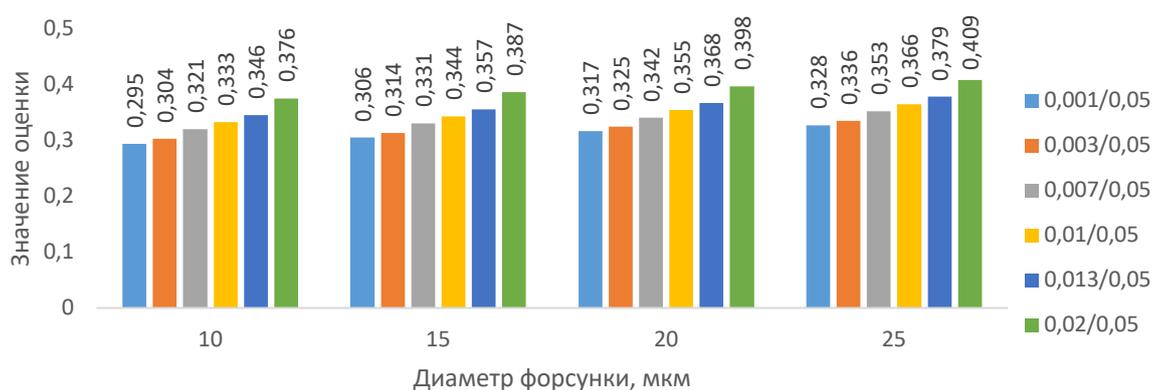


Рисунок 60 - Оценка пылеосаждения при различных диаметрах форсунки от 10 до 25 мкм, изменения частоты колебания от 1 до 20 Гц при объеме воздуха 50

мг/м³

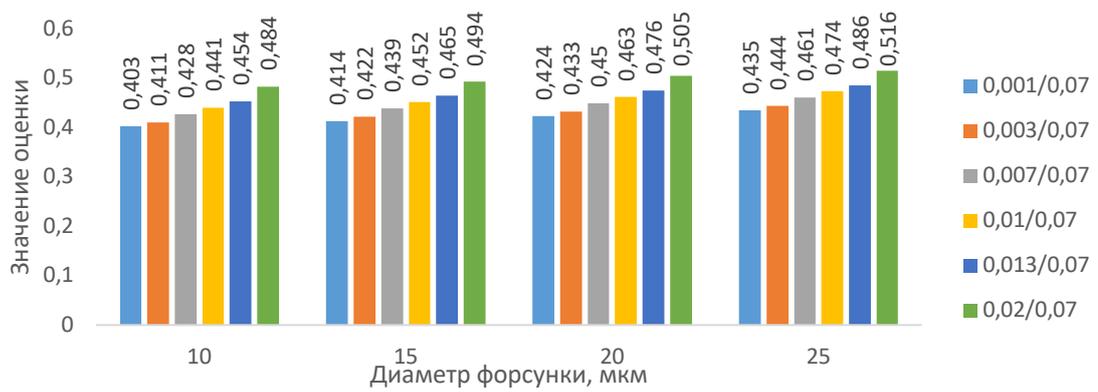


Рисунок 61 - Оценка пылеосаждения при различных диаметрах форсунки от 10 до 25 мкм, изменения частоты колебания от 1 до 20 Гц при объеме воздуха 70 мг/м³

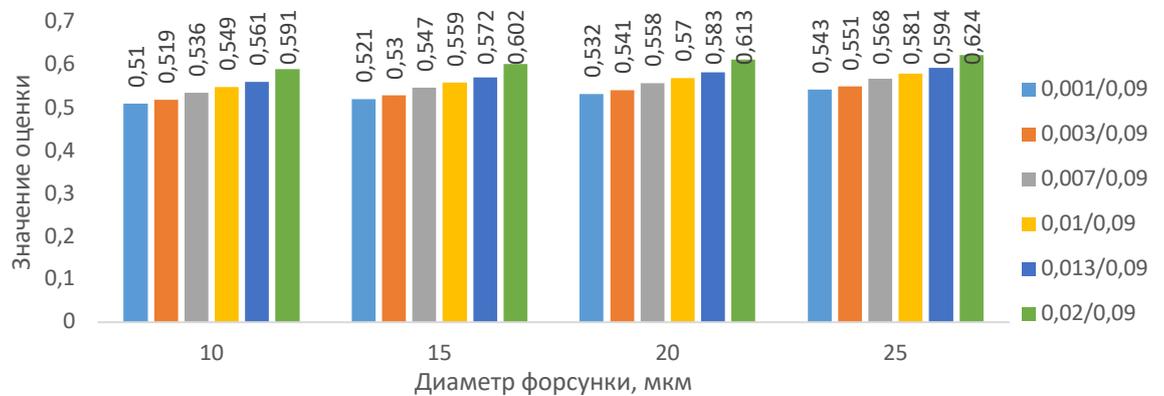


Рисунок 62 - Оценка пылеосаждения при различных диаметрах форсунки от 10 до 25 мкм, изменения частоты колебания от 1 до 20 Гц при объеме воздуха 90

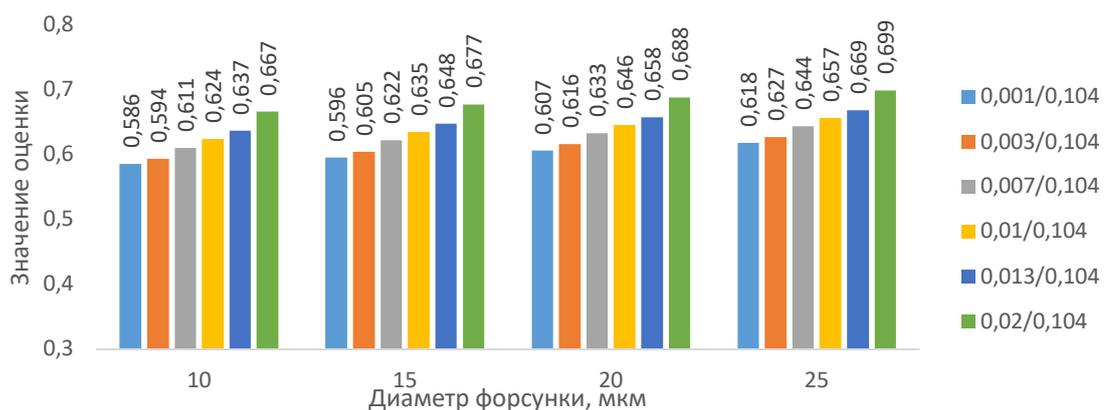


Рисунок 63 – Оценка пылеосаждения при различных диаметрах форсунки от 10 до 25 мкм, изменения частоты колебания от 1 до 20 Гц при объеме воздуха 104 мг/м³

Согласно уравнению 9 при условии, что нам известна ширина интервала при определенных значениях $V_{1N_{1i}max}$ и $V_{1N_{1i}min}$, можно определить условное время осаждения пыли для $V_{1N_{1i}min}$ =ПДК, т.е. в нашем случае $0,3 \text{ мг/м}^3$. В качестве первичного преобразования и расчета возьмем данные из эксперимента, описывающего комбинированным методом осаждения, где диаметр форсунки равен 10 мкм , частота пульсаций – 13 Гц , а расход воздуха $104 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$1 + 3,2 \lg N_{ij} = \frac{V_{1N_{1i}max} - V_{1N_{1i}min}}{h_x}$$

$$1 + 3,2 \log N_{25} = 5,473$$

$$h_x = \frac{V_{1N_{1i}max} - V_{пдк}}{5,473} = \frac{12,38 - 0,3}{5,473} = 2,21$$

$$1 + 3,2 \lg N_x = \frac{V_{1N_{1i}max} - V_{1пдк}}{h_x} = \frac{12,38 - 0,3}{1,52} = 7,95$$

$$3,2 \lg N_x = 7,95 - 1 = 6,95$$

$$\lg N_x = \frac{6,95}{3,2} = 2,171875$$

$$N^x = 10^{2,171875} = 149$$

$$t = N^x * 5 = 149 * 5 = 745 \text{ сек}$$

Тогда полная формула расчета времени пылеосаждения будет рассчитываться:

$$t_{\text{осаж.}} = 10^{\frac{C_0 - C_{\text{тр.}}}{h} - 1} \cdot 5 \quad (12)$$

Где $t_{\text{осаж.}}$ – расчетное время осаждения, с; h – ширина временного интервала (коэффициент осаждения, мг/м^3);
 C_0 ($V_{1N_{1i}max}$) – начальная концентрация интервала (коэффициент аэрозоля, мг/м^3);
 $C_{\text{тр.}}$ ($V_{1N_{1i}min}$) – требуемая концентрация аэрозоля, мг/м^3 ;

Проведя преобразование вышеприведенной формулы, определим условное количество циклов (времени), необходимых для достижения концентрации пыли

до уровня, соответствующей ПДК для всех позиций, которые установлены при проведении эксперимента.

Таблица 16 – Результаты расчета времени осаждения пыли и коэффициент осаждения (ширины интервалов) для всех проведенных экспериментов

Позиции	Диаметр форсунки, мкм V3	Частота, Гц	Расход, V5	Концентрация, мг/м ³ C		Коэффициент осаждения, h	Осаждение пыли до уровня ПДК=0,3	
				C ₀	C _{тр.}		Циклов	Время в сек
1.	0	0	0	13,43	10,66	0,505	6,31*10 ⁷	>12000
2.	10	0	0	13,46	4,65	1,610	175	875
3.	15	0	0	13,18	7,18	1,096	2297	11485
4.	20	0	0	13,21	5,68	1,376	425	2125
5.	10	13	104	12,38	4,06	1,520	149	745
6.	15	13	104	13,17	5,00	1,494	238	1190
7.	20	13	104	13,49	4,86	1,575	200	1000
8.	10	1	104	13,60	5,51	1,478	316	1580
9.	10	3	104	13,30	5,95	1,343	519	2595
10.	10	7	104	13,50	5,30	1,498	281	1405
11.	10	10	104	13,60	7,14	1,180	1636	8180
12.	10	20	104	13,20	6,16	1,286	670	3350
13.	10	13	50	13,27	4,99	1,512	236	1180
14.	10	13	70	13,01	6,01	1,278	631	3155
15.	10	13	90	13,42	4,27	1,673	137	685

Согласно проведенным расчетам (табл. 16), можно сделать вывод, что процесс увеличения времени пылеосаждения находится в прямой зависимости от

размеров форсунки, частоты и объема воздуха. Максимальная оценка пылеосаждения достигнута (0,624) при следующих условиях:

- диаметр форсунки - 10 мкм;
- частота пульсаций - 10 Гц;
- объем воздуха 104 мг/м³.

Минимальная оценка пылеосаждения достигнута (0,263) при следующих условиях:

- диаметр форсунки 10 мкм;
- частоте 13 Гц;
- объеме воздуха 50 мг/м³.

3.2.2 Моделирование процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции

С целью апробации ранее полученной формулы расчёта времени пылеосаждения было выполнено численное моделирование процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц в ограниченном объёме экспериментальной установки. Моделирование проводилось на основе экспериментальных данных, с целью подтверждения их воспроизводимости. Поскольку при проведении экспериментов воздействующие факторы (орошение и пульсирующая вентиляция) пылеосаждения оказывали влияние на пыль в начале осаждения, отдельное внимание уделено начальному, наиболее динамичному участку кривых — первым 120 секундам после включения воздействующих факторов.

Именно в этот интервал наблюдается максимальное влияние орошения (коагуляция частиц пыли в объёме) и пульсирующей вентиляции (как фактора, ускоряющего перемешивание и осаждение частиц аэрозоля). За пределами указанного окна доминируют более медленные механизмы — естественная седиментация и турбулентная диффузия, — поэтому выбор временного диапазона

0–120 с позволяет наиболее чувствительно тестировать адекватность формулы. Результаты моделирования представлены на рисунках 64–72 [154].

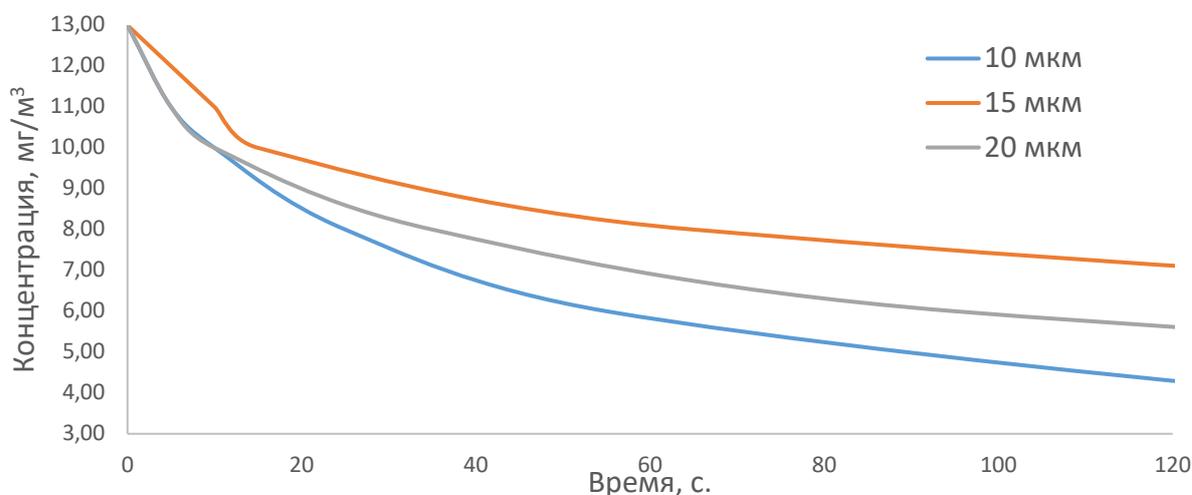


Рисунок 64– Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с изменением диаметра форсунок (в первые 120 с.)

Согласно рисунку 64 при осаждении пыли только орошением наибольшая эффективность достигается при использовании форсунки на 10 мкм. Концентрация аэрозоля в первые 120 секунд орошения снижается интенсивнее при использовании форсунки с минимальным из исследуемых диаметров сопла. Такая же тенденция сохраняется при увеличении временного диапазона вплоть до нулевого значения концентрации аэрозоля (рис. 65).

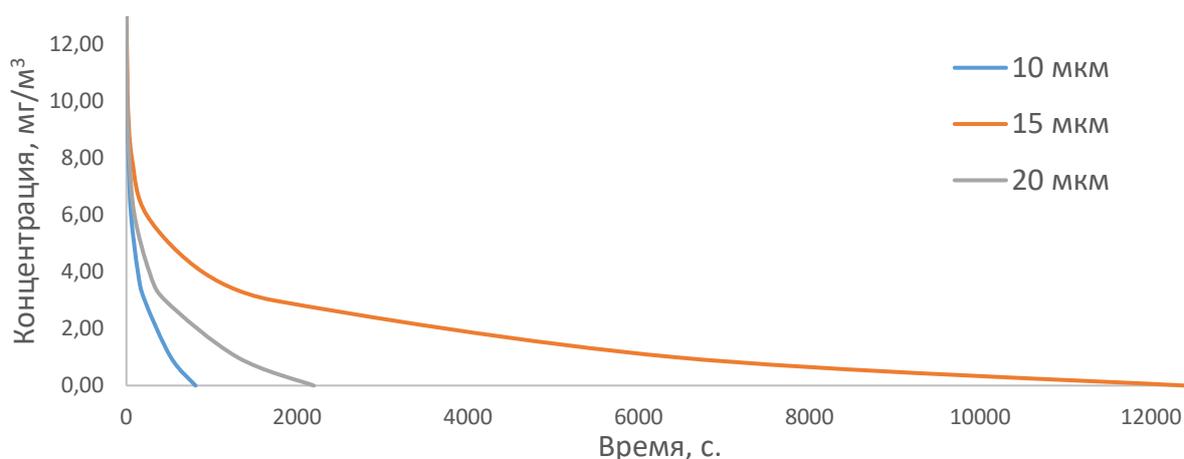


Рисунок 65 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с изменением диаметра форсунок (при полном пылеосаждении)

Согласно рисунку 65, при проведении моделирования процесса пылеосаждения наблюдается постепенное снижение концентрации аэрозоля вплоть до нулевого уровня. Наиболее отчетливо такая динамика прослеживается при использовании орошения с форсункой диаметром сопла 10 мкм, при котором характер осаждения частиц сохраняет устойчивую направленность, представленную при диапазоне в 120 с, на всем протяжении проведения эксперимента [155].

Далее производилось моделирование осаждения аэрозоля орошением с применением метода пульсирующей вентиляции (рис. 66). На представленном графике показана динамика снижения концентрации аэрозоля во времени при использовании комбинированного метода (частота пульсатора — 13 Гц, расход воздуха на пульсаторе — 104 м³/ч). По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат — концентрация аэрозоля в мг/м³. Видно, что во всех случаях наблюдается устойчивая тенденция к понижению концентрации с исходного уровня около 12–13 мг/м³ до значений порядка 4–5 мг/м³ в течение 120 секунд.

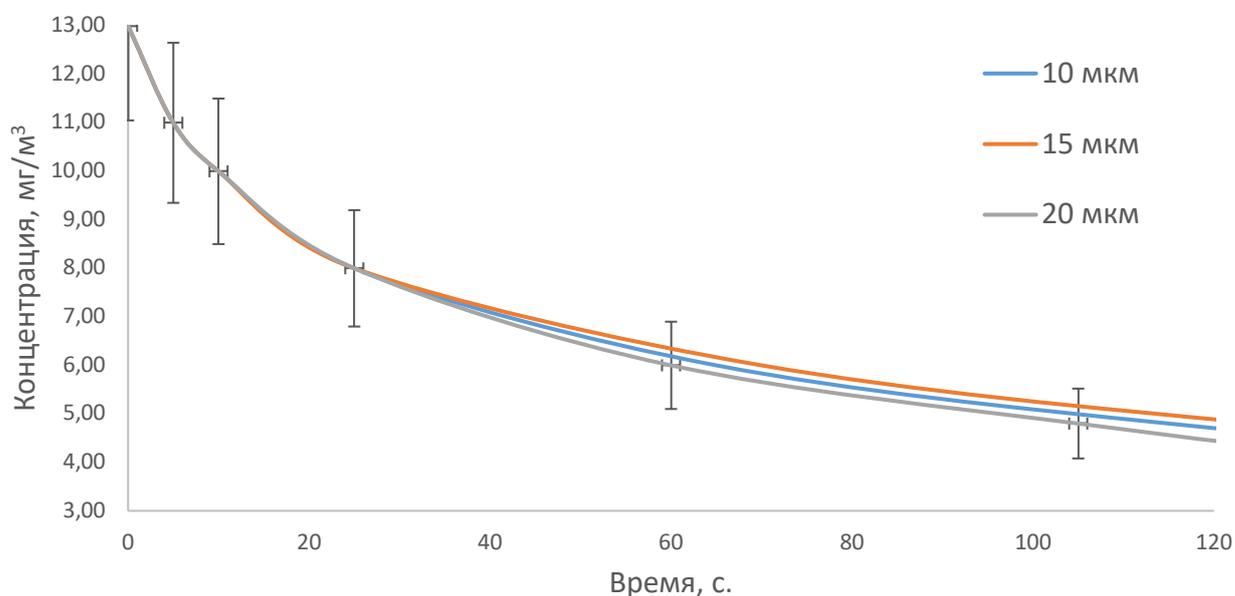


Рисунок 66 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении диаметра форсунок (в первые 120 с)

Сравнение кривых для форсунок диаметром 10, 15 и 20 мкм показывает, что характер процесса осаждения остается схожим, различия выражаются лишь в незначительном смещении скоростей снижения концентрации. Кривая для сопла 20 мкм располагается немного ниже остальных, что указывает на более интенсивное улавливание аэрозольных частиц на протяжении всего процесса. При изменении диаметра сопла на 10 и 20 мкм скорость осаждения замедляется, и концентрация в те же моменты времени оказывается выше, хотя общая форма кривых сохраняется идентичной. Предел погрешности составляет менее 15 %. Таким образом, график демонстрирует постепенное и равномерное снижение концентрации аэрозоля, отражающее эффективность процесса осаждения при различных диаметрах форсунок, что отчетливо видно на всем временном промежутке пылеосаждения до нулевых значений концентрации (рис. 67).

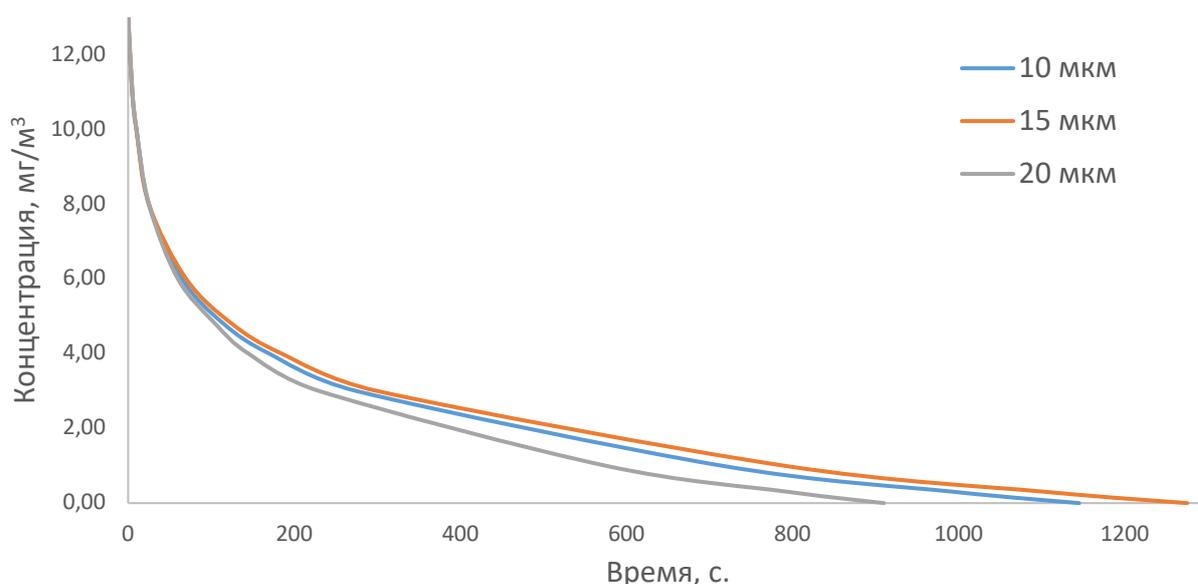


Рисунок 67 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении диаметра форсунок (при полном пылеосаждении)

Несмотря на то, что в рамках моделирования комбинированного метода осаждения форсунка с диаметром сопла 20 мкм показывает несколько более

высокую скорость снижения концентрации, применение форсунки на 10 мкм также демонстрирует сопоставимый результат. В первые 120 секунд различие между кривыми не превышает 15 %, что укладывается в допустимые пределы экспериментальной погрешности и указывает на практически равную эффективность методов.

На полном интервале моделирования (рис. 67), отражающем процесс снижения концентрации аэрозоля вплоть до нулевых значений, форсунка с диаметром сопла на 20 мкм демонстрирует более высокую скорость осаждения. Однако форсунка на 10 мкм также показывает стабильную динамику снижения концентрации, практически не уступая в эффективности. Различия между кривыми на начальном участке времени не превышают 15 %, что свидетельствует о близких характеристиках процессов осаждения. Таким образом, обе конфигурации обеспечивают сопоставимые результаты по эффективности улавливания аэрозоля на протяжении всего моделируемого периода.

Следующим этапом проведено моделирование процесса пылеосаждения при использовании комбинированного метода с варьированием частоты пульсирующего устройства. В качестве исходных параметров применялась форсунка с диаметром сопла 10 мкм, при этом расход воздуха на пульсаторе поддерживался на уровне 104 м³/ч, что обеспечивало воспроизводимость условий эксперимента. На рисунке 68 представлена динамика снижения концентрации аэрозоля во времени (первые 120 с) при частотах пульсации 1, 3, 7, 10, 13 и 20 Гц.

Анализ кривых показывает, что во всех рассмотренных случаях наблюдается устойчивая тенденция к понижению концентрации аэрозоля с исходных значений около 13 мг/м³ до уровня ниже 5 мг/м³ в течение первых 120 секунд процесса. При этом форма кривых различается в зависимости от выбранной частоты, что указывает на влияние данного параметра на интенсивность осаждения частиц. Наиболее выраженное снижение концентрации фиксируется при частотах 13 и 20 Гц, где наблюдается более крутой спад значений по сравнению с другими режимами. При низких частотах 1 и 3 Гц процесс также характеризуется

устойчивым уменьшением концентрации, однако снижение происходит более плавно. При частоте 7 Гц положение кривой занимает промежуточное место, демонстрируя динамику, близкую к результатам при высокочастотных режимах.

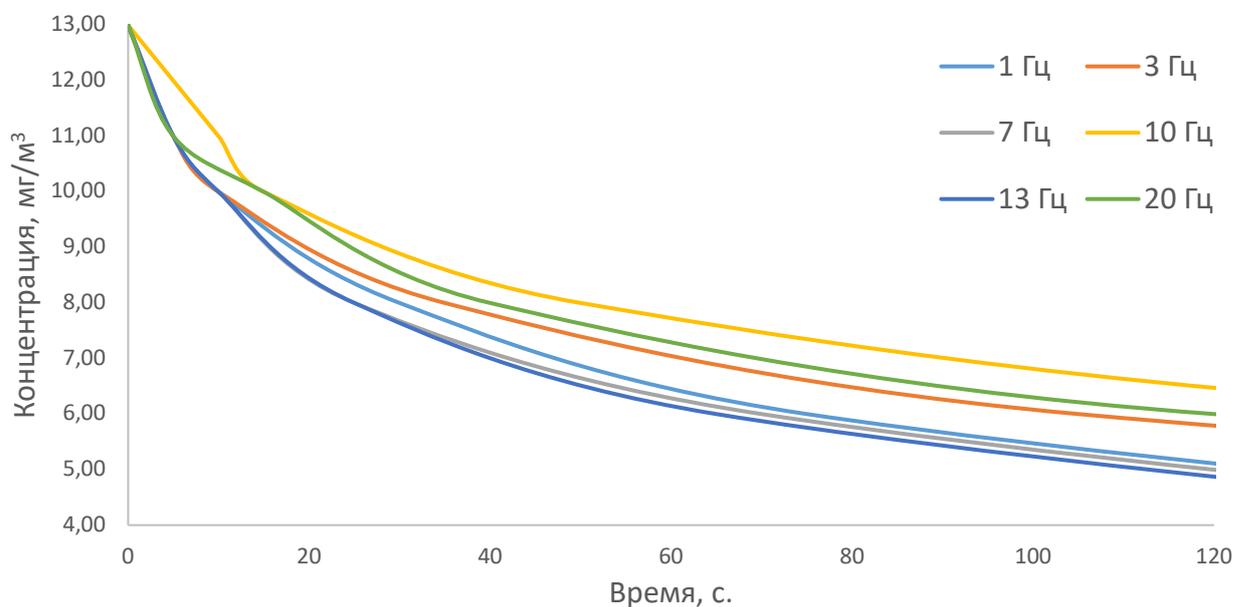


Рисунок 68 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении частоты пульсаций (в первые 120 с.)

Использование частоты 10 Гц приводит к наиболее заметному смещению кривой в сторону замедленного снижения, что отражает меньшую интенсивность осаждения в данном диапазоне. Таким образом, полученные данные демонстрируют зависимость формы и скорости изменения концентрации аэрозоля от частоты работы пульсирующего устройства, при этом во всех случаях сохраняется общая закономерность последовательного и равномерного уменьшения концентрации во времени.

Согласно рисунку 69, где представлен весь диапазон моделирования, отражен процесс снижения концентрации до нулевых значений, указанная зависимость проявляется ещё более отчетливо. При низких частотах (1 и 3 Гц) процесс завершается в относительно короткие сроки — до 1000–2000 секунд. Для

частот 7, 13 и 20 Гц характерно ускоренное снижение на начальном этапе с последующим равномерным завершением процесса, что приводит к достижению минимальных значений концентрации в пределах 2000–3000 секунд.

Наибольшая продолжительность осаждения также характерна для частоты 10 Гц: кривая демонстрирует постепенное снижение на протяжении более 5000 секунд, что указывает на замедленный характер процесса при данных условиях. Таким образом, результаты моделирования подтверждают наличие прямой зависимости между частотой работы пульсирующего устройства и скоростью осаждения аэрозоля: при ряде режимов процесс завершается быстрее, тогда как при частоте 10 Гц наблюдается наиболее длительный переход к нулевым значениям концентрации.

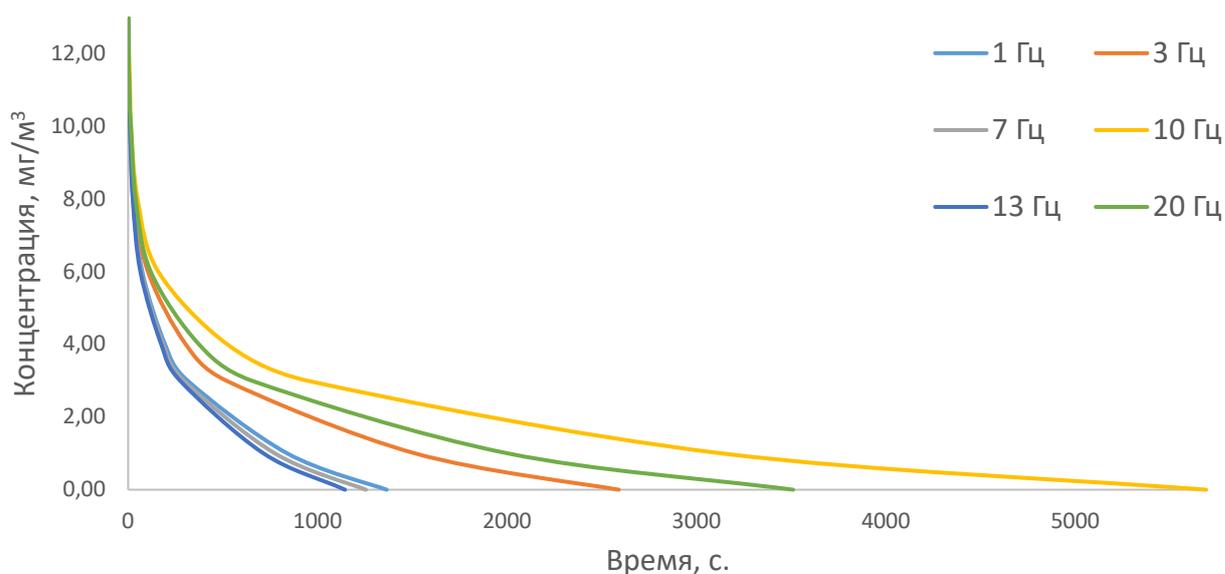


Рисунок 69 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при изменении частоты пульсаций (при полном пылеосаждении)

На рисунке 70 представлена динамика изменения концентрации аэрозоля при моделировании процесса осаждения комбинированным методом с варьированием расхода воздуха пульсирующего устройства (50, 70, 90 и 104 м³/ч) в течение 120

секунд. В начальный момент концентрация аэрозоля составляла порядка 13 мг/м³, далее во всех случаях фиксируется закономерное снижение.

Наиболее близкие результаты продемонстрировали режимы с расходами 90 и 104 м³/ч: кривые располагаются практически идентично и сохраняют схожую форму как на начальном участке, так и в последующей части наблюдаемого интервала. Динамика этих режимов указывает на равномерное и ускоренное снижение концентрации по сравнению с результатами при 70 м³/ч, где процесс протекает медленнее. При расходе 50 м³/ч кривая занимает промежуточное положение, сближаясь с кривыми 90 и 104 м³/ч после первых 20 секунд.

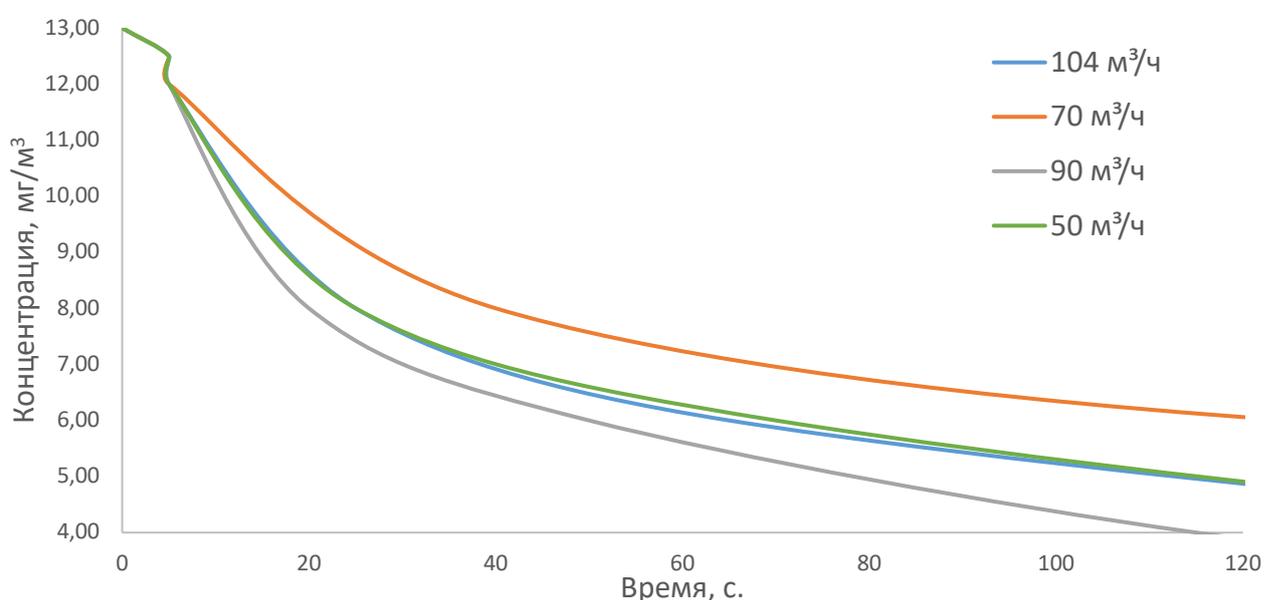


Рисунок 70 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при различных значениях расхода воздуха (в первые 120 с.)

На рисунке 71 показан весь диапазон процесса осаждения до достижения нулевых значений концентрации. В этом случае зависимость между расходом воздуха и продолжительностью процесса проявляется особенно отчетливо. Наиболее быстрое завершение осаждения зафиксировано при расходе 90 м³/ч, где концентрация достигает нулевых значений менее чем за 600 секунд. Динамика

режима с расходом $104 \text{ м}^3/\text{ч}$ практически совпадает с результатами при $90 \text{ м}^3/\text{ч}$, что подтверждает их эквивалентность по эффективности. Близкие показатели демонстрирует также режим $50 \text{ м}^3/\text{ч}$, однако время достижения минимальных значений несколько больше. При расходе $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ процесс осаждения протекает значительно медленнее, и кривая сохраняет высокие значения концентрации в течение продолжительного времени, вплоть до 3500 секунд.

Сравнительный анализ укороченного и полного интервалов моделирования позволяет сделать вывод о наибольшем сходстве режимов с расходами 90 и $104 \text{ м}^3/\text{ч}$. Независимо от продолжительности наблюдаемого периода их кривые демонстрируют практически одинаковый характер снижения концентрации, что указывает на сопоставимую эффективность осаждения при данных параметрах.

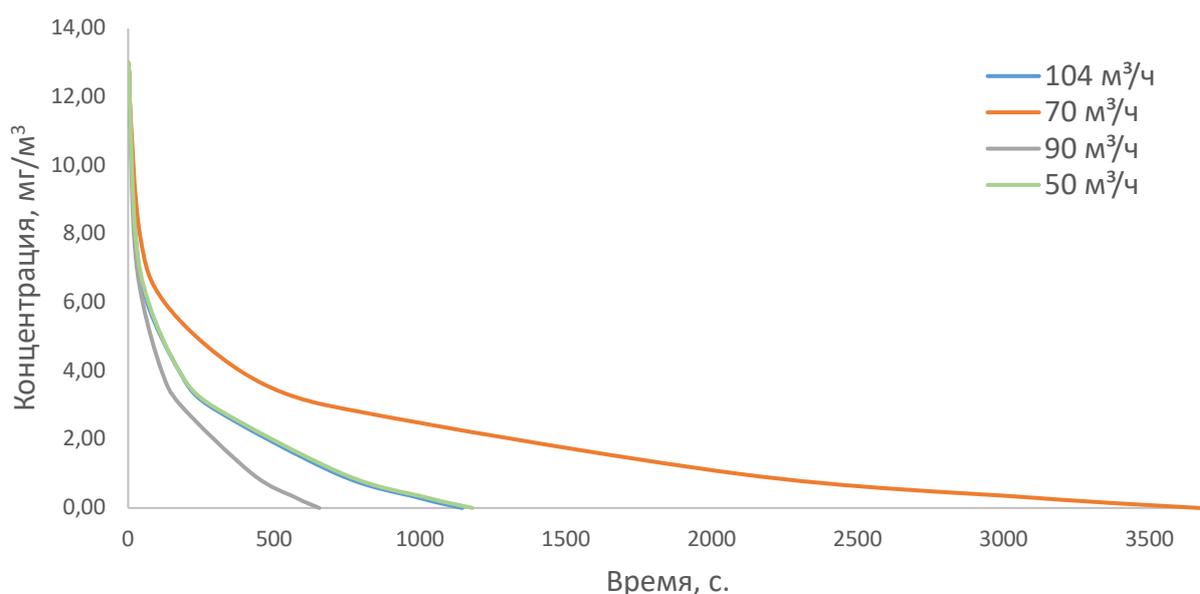


Рисунок 71 – Результаты моделирования процесса пылеосаждения орошением с применением метода пульсирующей вентиляции при различных значениях расхода воздуха (при полном пылеосаждении)

Выводы по главе 3

Проведённое численное моделирование процессов пылеосаждения в замкнутом объёме экспериментальной установки подтвердило воспроизводимость

полученной ранее формулы расчёта времени осаждения аэрозольных частиц и позволило проанализировать влияние основных параметров комбинированного метода (орошение и пульсирующая вентиляция) на динамику снижения концентрации. Особое внимание уделялось начальному интервалу 0–120 с, когда проявляется максимальное воздействие орошения (за счёт коагуляции частиц в объёме) и пульсирующей вентиляции (как фактора перемешивания и ускоренного осаждения).

Результаты моделирования показали, что наибольшая эффективность орошения достигается при использовании форсунки с диаметром сопла 10 мкм. Данный параметр обеспечивает наиболее интенсивное снижение концентрации аэрозоля как на укороченном интервале (120 с), так и в полном диапазоне до нулевых значений. Сравнение различных диаметров подтвердило, что различия между кривыми для 10 и 20 мкм на начальном участке не превышают 15 %, что свидетельствует о сопоставимой эффективности, однако устойчивое преимущество сохраняется именно за минимальным диаметром.

При варьировании частоты пульсирующего устройства выявлено, что оптимальным значением является 13 Гц. Данный режим обеспечивает выраженное ускорение снижения концентрации аэрозоля как в первые 120 секунд, так и на полном интервале моделирования, где завершение процесса фиксируется в пределах 2000–3000 секунд. Частоты 1 и 3 Гц приводят к более плавной динамике, а использование 10 Гц сопровождается значительным замедлением процесса, что подтверждается длительностью осаждения более 5000 секунд.

Анализ влияния расхода воздуха на пульсаторе показал, что наиболее близкие и практически идентичные результаты достигаются при значениях 90 и 104 м³/ч. Кривые в этих режимах располагаются, практически совпадая, как на интервале 0–120 с, так и при полном осаждении до нулевой концентрации. Время достижения минимальных значений в обоих случаях составляет порядка 600–1200 секунд, что указывает на сопоставимую эффективность режимов. Расход 50 м³/ч демонстрирует близкую динамику, но с несколько увеличенным временем

завершения процесса, тогда как расход $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ характеризуется наибольшим замедлением — вплоть до 3500 секунд.

Таким образом, сопоставление результатов всех этапов моделирования позволяет выделить оптимальные параметры комбинированного метода пылеосаждения: диаметр сопла форсунки $\approx 10 \text{ мкм}$, частота пульсирующего устройства $\approx 13 \text{ Гц}$, расход воздуха $\approx 90 - 104 \text{ м}^3/\text{ч}$. Данные условия обеспечивают наилучшее сочетание скорости и стабильности процесса снижения концентрации аэрозоля, подтверждая адекватность выбранной модели и её практическую применимость.

4. Апробация метода комбинированного осаждения пыли руды железной агломерационной в промышленных условиях

4.1 Подтверждение подобия процессов осаждения в лабораторных и промышленных условиях путем расчета числа Рейнольдса.

Одним из ключевых направлений совершенствования систем обеспыливания при обращении с железорудным концентратом является целенаправленное повышение эффективности процессов осаждения пылевых частиц в локальных зонах интенсивного пылеобразования, прежде всего в районах перегрузки и пересыпки материала. Указанные участки производственного цикла характеризуются сложными аэродинамическими условиями, обусловленными ударным рассеиванием сыпучего материала при его свободном падении, дроблением агломератов и формированием вторичных пылевых фракций. Дополнительным негативным фактором является кратковременная высокая турбулентность воздушных потоков, возникающая вследствие ссыпания материала, что существенно снижает эффективность традиционных методов пылеподавления, основанных исключительно на стационарном орошении или локальной аспирации.

В условиях повышенной нестационарности воздушной среды стандартные системы обеспыливания не обеспечивают устойчивого захвата и осаждения мелкодисперсных частиц, обладающих низкой инерционностью и длительным временем пребывания во взвешенном состоянии. Это приводит к распространению пыли не только по стенкам бункеров, но и за пределы технологических укрытий, росту запыленности производственных помещений и повышению нагрузки на технологическое оборудование.

Комбинированный метод осаждения основан на сочетании гидродинамического орошения с управляемым пульсирующим воздействием воздушного потока, реализуемого посредством метода пульсирующей вентиляции.

Внедрение данного подхода позволяет интенсифицировать процессы коагуляции пылевых частиц с каплями орошающей жидкости, а также повысить вероятность их улавливания за счёт периодического изменения скоростных и направленных характеристик воздушного потока. Использование пульсирующей вентиляции способствует формированию нестационарных режимов движения воздуха, при которых создаются благоприятные условия для осаждения мелкодисперсной пыли и повышения общей эффективности систем обеспыливания в зонах перегрузки ППЖК.

При определении соотношения параметров, характеризующих производственную часть процесса разгрузки ППЖК, и условий, реализуемых в ходе лабораторных исследований, в качестве одного из основных критериев подобия было использовано число Рейнольдса. Данный безразмерный параметр широко применяется в гидродинамике и аэродинамике для количественной оценки режима течения и определяется как отношение сил инерции к силам вязкости в потоке жидкости или газа.

Использование числа Рейнольдса позволяет корректно сопоставлять натурные и модельные условия, обеспечивая воспроизводимость характерных особенностей течения и обоснованность экстраполяции результатов лабораторных экспериментов на реальные производственные процессы. Исходя из литературных данных, средний диаметр вписанной окружности в месте разгрузки составляет $R \approx 3$ м (рис. 72). Учитывая справочные значения вязкости воздуха η (Па·с), плотность среды, ρ (кг/м³) и скорости движения воздуха, v (м/с) число Рейнольдса будет рассчитано согласно выражению 12.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (12)$$

где, ρ — плотность среды, кг/м³; v — скорость движения воздуха, м/с; D — гидравлический диаметр, м; η — вязкость воздуха, Па·с или кг/(м·с).

Результаты расчетов числа Рейнольдса (Re) для места разгрузки ППЖК на горно-металлургическом предприятии и лабораторной установки при атмосферном давлении $P=101,325$ кПа и температуры $t = 20-25^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 17.

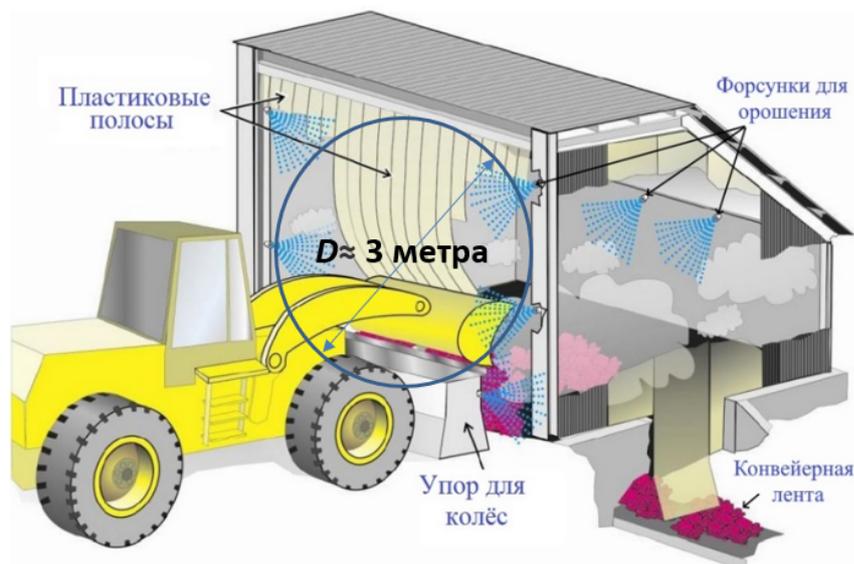


Рисунок 72 – Демонстрация диаметра приемного бункера при процессе разгрузки ППЖК

Таблица 17 – Результаты расчета числа Рейнольдса для бункера разгрузки ППЖК и лабораторной установки.

	Плотность воздуха, кг/м ³	Вязкость воздуха, Па·с	Гидравлический диаметр, м	Скорость движения воздуха, м/с	Re
Бункер разгрузки ППЖК	1,2	0,0000181	3	1,3	26,5*10⁴
Лаб. установка	1,2	0,0000181	1	4	26,5*10⁴

Согласно таблице 17, расчетное значение Re одинаково для производственной площадки горно-металлургического производства – бункер разгрузки ППЖК, и лабораторной установки настоящего исследования, что позволяет подтвердить идентичность происходящих процессов.

4.2 Оценка погрешностей измерения и уточнение эффективности комбинированного метода пылеподавления

Полученные в ходе исследований данные о кинетике осаждения аэрозольных частиц, определённые с применением весового метода, аппаратного комплекса «Аэрокон-П», а также рассчитанные на основе разработанной математической модели, демонстрируют удовлетворительное согласование между собой. Анализ результатов, представленных на рисунке 73, показал, что расхождение между экспериментальными и расчётными значениями не превышает 25 %, что укладывается в пределы допустимой погрешности для подобных аэродинамических и массообменных процессов. Данный уровень расхождений обусловлен как особенностями измерительных методик, включая инерционность чувствительных элементов приборов и влияние фоновых аэрозольных потоков, так и упрощениями, принятыми при математическом описании процесса осаждения.

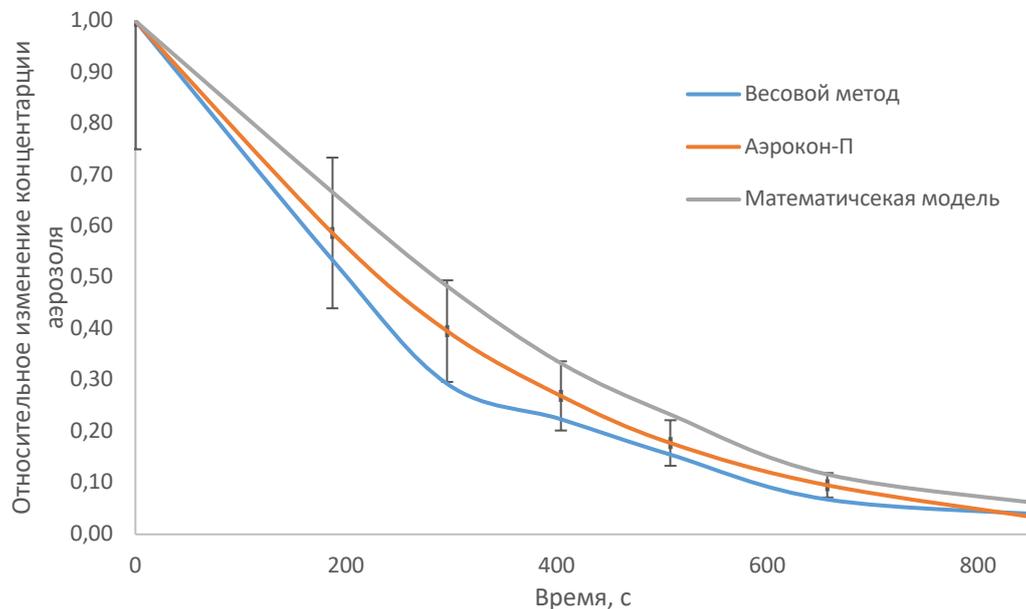


Рисунок 73 – Сводный график зависимости относительного изменения концентрации аэрозоля от времени при использовании гранулометрического метода измерения концентрации, измерителя массовой концентрации аэрозольных частиц «Аэрокон-П» и расчете математической моделью

Установленное согласование результатов, полученных с использованием различных методов измерений и расчётов, свидетельствует о высокой достоверности экспериментальных наблюдений и подтверждает корректность выбранных численных подходов к моделированию кинетики пылеосаждения. Совпадение трендов изменения концентрации аэрозоля во времени, зафиксированных независимыми методами, позволяет рассматривать полученные данные как репрезентативные для оценки эффективности исследуемых способов пылеподавления. Кроме того, сопоставимость результатов весового метода и показаний аппаратного комплекса «Аэрокон-П» указывает на отсутствие существенных систематических искажений, способных принципиально повлиять на интерпретацию экспериментальных зависимостей.

С учётом выявленной совокупной погрешности измерений была выполнена пересчётная корректировка показателя эффективности комбинированного метода пылеосаждения по отношению к традиционному орошению. В рамках данной корректировки исходное значение эффективности, рассчитанное на уровне 50 %, было снижено до 37,5 %, что позволяет более адекватно отразить реальную степень улавливания пылевых частиц в условиях практической реализации технологии. Проведённая корректировка обеспечивает консервативную оценку эффективности и повышает надёжность выводов, полученных по результатам исследования. Таким образом, скорректированный показатель эффективности может быть использован в качестве обоснованного исходного параметра при инженерных расчётах и технико-экономическом анализе внедрения комбинированного метода пылеосаждения.

4.3 Сравнительная оценка эффективности осаждения орошением и комбинированного метода пылеосаждения при разгрузке ППЖК

Результаты проведённых сравнительных испытаний, представленные на рисунке 74, свидетельствуют о том, что применение традиционного орошения

пылевоздушной среды обеспечивает время осаждения пылевых частиц порядка 36 минут по экспериментальным данным при расчётном значении, равном 43 минутам. Зафиксированное расхождение (относительная погрешность) между расчётными и экспериментальными значениями не превышает 20 %, что указывает на удовлетворительную сходимость теоретической модели с реальными условиями протекания процесса и подтверждает корректность принятых допущений. Вместе с тем установлено, что эффективность пылеподавления при традиционном орошении существенно ограничивается инерционными свойствами пылевых частиц, а также недостаточной вероятностью их столкновения с каплями влаги, особенно в диапазоне мелкодисперсных фракций. Указанные факторы приводят к снижению интенсивности массообмена и увеличению продолжительности процесса осаждения, что негативно сказывается на общей производительности системы пылеподавления.

В отличие от традиционного подхода, применение комбинированного метода, основанного на дополнительном импульсном воздействии с перепадом давления Δp на пылевоздушную смесь, принципиально изменяет аэродинамические условия взаимодействия частиц пыли и капель жидкости. Импульсное воздействие способствует формированию нестационарных турбулентных структур, интенсифицирующих процессы коагуляции и увеличивающих частоту эффективных соударений пылевых частиц с орошающей фазой. В результате создаются более благоприятные условия для улавливания как крупнодисперсных, так и мелкодисперсных аэрозольных частиц, что позволяет существенно повысить суммарную эффективность пылеосаждения. Дополнительно отмечается снижение влияния инерционных ограничений за счёт вовлечения частиц в пульсирующее движение потока.

Согласно данным лабораторных исследований, полученных в условиях применения комбинированного метода, время пылеосаждения сократилось до 20 мин, с учетом корректировки погрешности измерительного прибора. Принципиально важно, что экспериментально зафиксированное значение

полностью совпадает с расчётным прогнозом, что подтверждает адекватность разработанной расчётной модели и её применимость для инженерных оценок. Достигнутое сокращение продолжительности процесса осаждения свидетельствует о высокой эффективности импульсного воздействия как инструмента интенсификации пылеподавления в пылеобразующих зонах. Таким образом, результаты исследований обоснованно демонстрируют целесообразность внедрения комбинированного метода для повышения экологической и промышленной безопасности технологических процессов.

Ускорение процесса осаждения объясняется совместным действием гидродинамических и аэродинамических факторов. Импульс давления, создаваемый пульсирующим потоком из-за разницы скоростей (Δv), ускоряет коагуляцию с мелкодисперсными каплями тумана. В результате увеличивается вероятность образования структур с более высокой массой, что способствует их ускоренному выпадению из воздушного потока. При этом наблюдается снижение общего расхода воды и уменьшение переувлажнения поверхностей в зоне разгрузки, что имеет важное эксплуатационное значение для промышленных объектов, связанных с транспортировкой и складированием железорудного концентрата.

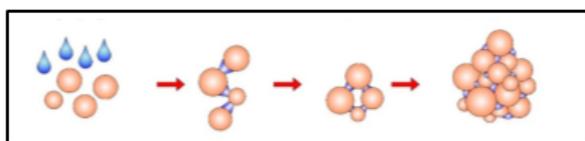
Результаты проведённых экспериментальных исследований и инженерных расчётов подтверждают эффективность предложенного метода пылеосаждения, основанного на комбинации орошения и импульсного воздействия воздушного потока. Данный способ обеспечивает интенсификацию процессов коагуляции пылевых частиц с водяными каплями, что приводит к значительному ускорению осаждения аэрозольной фазы. В среднем время стабилизации концентрации пыли в рабочем объёме сокращается не более чем в два раза по сравнению с традиционными системами, при этом обеспечивается равномерность осаждения по высоте и объёму камеры.

Проведённые эксперименты показали, что использование комбинированного метода пылеосаждения позволяет существенно оптимизировать процесс захвата

пылевых частиц различного фракционного состава, что оказывает положительное влияние на эффективность пылеподавления. Этот метод не только способствует более равномерному распределению частиц по рабочей зоне, но и может позволить снизить общий расход воды, необходимый для эффективного подавления пыли, что, в свою очередь, снизит потребность в дополнительных ресурсах. В результате такой оптимизации процесса удаётся предотвратить переувлажнение поверхностей оборудования, что значительно сказывается на повышении эксплуатационной безопасности. Такой подход, помимо прочего, способствует снижению эксплуатационных затрат, увеличивает срок службы оборудования и повышает долговечность конструктивных элементов технологических установок, что делает его более эффективным и экономически выгодным в долгосрочной перспективе.

Пылеосаждение орошением

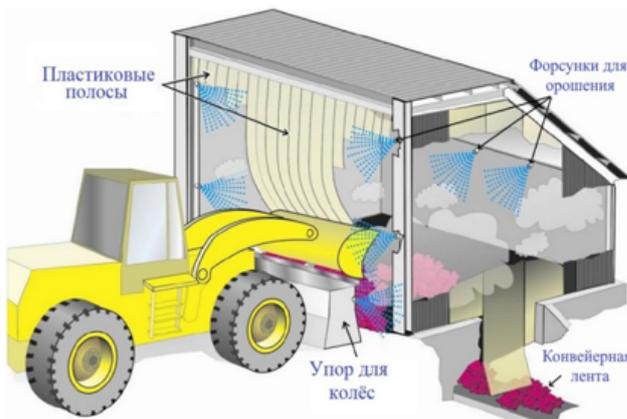
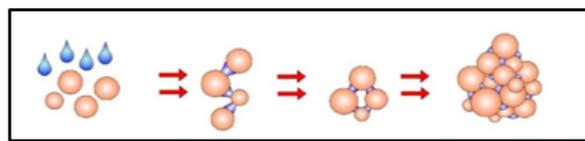
$$v = const;$$



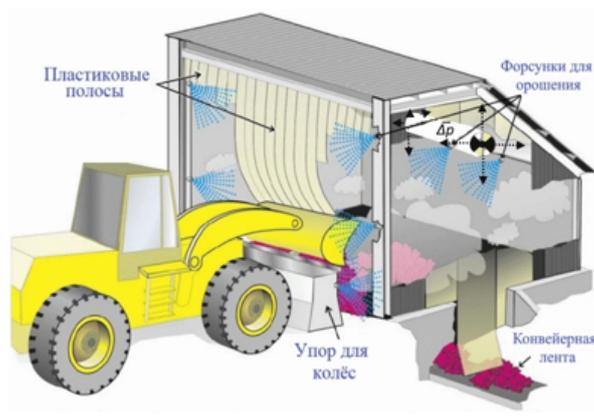
где, v – скорость частицы (структуры) (м/с); a – ускорение (м/с²); t – время (с); Δv – разность скоростей при пульсирующем режиме движения воздуха.

Совместный (комбинированный) метод

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



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



Время осаждения согласно эксперименту – **20 мин.** ($\Xi=37,5\%$)
 Время осаждения согласно расчету – **16 мин.**
 (погрешность <25%)

Рисунок 74 – Повышение эффективности пылеосаждения комбинированным методом при подготовке (разгрузке) продуктов железорудного концентрата

В целях экспериментального подтверждения результативности предлагаемого комбинированного метода осаждения аэрозольных частиц были выполнены пробные производственные испытания в условиях действующего промышленного объекта — предприятия ООО «ЛаймУпак». Указанное предприятие эксплуатирует технологическую линию по переработке полимерсодержащих отходов, характеризующуюся повышенным уровнем запыленности на отдельных этапах технологического процесса. Выбор данного объекта в качестве экспериментальной базы обусловлен типичностью условий формирования аэрозольной среды и возможностью сопоставления результатов с традиционными методами пылеподавления, применяемыми в аналогичных производствах.

Апробация рассматриваемого способа была проведена непосредственно на участке дробления полимерных отходов, включающем дробилку с загрузочным бункером, оснащённым штатной системой орошения. В процессе испытаний метод комбинированным осаждения аэрозоля реализовывался в штатном технологическом режиме без изменения производительности оборудования, что позволило обеспечить репрезентативность полученных данных. Фиксация концентрации аэрозольных частиц осуществлялась до и после воздействия комбинированного метода осаждения, что дало возможность объективно оценить степень снижения аэрозольной нагрузки в рабочей зоне и минимизировать влияние посторонних факторов.

Анализ результатов, зафиксированных в акте проведённых испытаний (приложение 3), показал, что применение комбинированным метода осаждения обеспечивает статистически значимое повышение эффективности улавливания аэрозольных частиц по сравнению с использованием исключительно водяного орошения. В частности, относительный прирост эффективности осаждения аэрозолей составил от 30 до 40 %, что свидетельствует о существенном усилении процессов взаимодействия аэрозольных частиц с дисперсной жидкой фазой и повышении вероятности их захвата.

Выводы по главе 4.

Существенным преимуществом предложенного метода является его влияние на техническое состояние оборудования в условиях длительной эксплуатации. Снижение запылённости воздушной среды уменьшает интенсивность абразивного и коррозионного износа узлов, подшипников, лент и кожухов транспортных систем. В результате увеличивается межремонтный ресурс агрегатов, сокращается количество отказов и внеплановых ремонтов, а также стабилизируются показатели производственной надёжности оборудования.

Повышение эффективности пылеподавления оказывает положительное влияние и на безопасность труда. Уменьшение концентрации пыли в рабочей зоне способствует снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций, улучшает видимость и санитарно-гигиенические условия труда. Таким образом, предложенный метод обеспечивает комплексное повышение уровня промышленной безопасности за счёт одновременного совершенствования технологических параметров и надёжности работы оборудования.

Итоговые результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации вентиляционных и пылеосадительных систем на объектах горно-металлургического комплекса. Реализация полученных рекомендаций способствует увеличению ресурса оборудования, снижению эксплуатационных потерь и формированию более устойчивой и безопасной технологической среды в условиях постоянного пылеобразования.

Заключение

На горно-металлургических предприятиях проблема осаждения взвешенной пыли является актуальной из-за ее вредных воздействий на здоровье и безопасность работников, а также на техническое оборудование и окружающую среду. Пыль содержит множество вредных веществ, которые могут вызвать различные заболевания дыхательных путей и даже онкологические заболевания. Кроме того, пыль может привести к износу и коррозии оборудования, что в свою очередь может снизить производительность оборудования и увеличить затраты на его ремонт и замену.

Для решения данной проблемы применяются различные методы очистки воздуха, такие как механическая фильтрация, электростатическая очистка, ультрафиолетовая обработка, осаждение, влажная очистка и др. Также используются методы локализации и изоляции источников аэрозольного загрязнения, а также методы управления производственными процессами с целью уменьшения образования аэрозолей. Один из наиболее эффективных методов - процесс осаждения жидкостным орошением, который позволяет уменьшить количество пыли в воздухе и повысить качество воздуха на производстве. Применение пульсирующей вентиляции и жидкостного орошения могут повысить эффективность пылеосаждения на горно-металлургических предприятиях.

Согласно проведенным экспериментам по пылеосаждению, было определено время осаждения пыли в лабораторном стенде при самостоятельном осаждении пыли, осаждении аэрозоля (при применении орошения используя форсунки на 10, 15 и 20 мкм) и осаждении аэрозоля комбинированным методом.

Зафиксированы параметры эксперимента по осаждению:

- влажность воздуха в лабораторном стенде - 25-30 %;
- температура воздуха в лабораторном стенде 22-25 °С;
- скорость движения воздуха, создаваемая генератором воздушного потока – не более 4 м/с.

Зафиксированы параметры системы орошения:

- форсунки диаметром ≈ 10 мкм;
- рабочее давление в системе подачи жидкости $\approx 5,4$ МПа;
- время распыления аэрозоля жидкости – не более 2 мин.

Определены оптимальные параметры пульсатора, использующегося при осаждении аэрозоля комбинированным методом:

– скорость движения воздуха внутри воздуховода, подающаяся на пульсатор – не менее 5 м/с;

- расход воздуха внутри воздуховода, подающаяся на пульсатор – 90 - 104 м³/ч;
- частота вращения подвижного сегмента пульсатора – 190 - 200 об/мин;
- площадь воздушных проемов пульсатора – $3 \cdot 10^{-3}$ м²;
- частота импульсов ≈ 13 Гц.

Согласно гистограммам распределения были подтверждены рациональные параметры пылеосаждения орошением пыли ППЖК с применением метода пульсирующей вентиляции. Рациональный диаметр форсунки по орошению составляет 10 мкм (мелкодисперсный аэрозоль). Максимально эффективное значение частоты пульсирующего устройства составляет область значений около 13 Гц. Значение расхода воздуха, подаваемого на пульсатор, способствующее повышению эффективности осаждения пыли составляет 90 - 104 м³/ч.

При обработке данных экспериментов построены графики зависимостей усредненных значений концентрации пыли при самостоятельном осаждении, при осаждении аэрозоля орошением и осаждении аэрозоля комбинированным методом. Согласно графикам, эффективность пылеосаждения с применением орошения (форсунка на 10 мкм), относительно процесса самоосаждения пыли (≈ 57 мин), составляет 43,2% (≈ 32 мин), однако при использовании установки пульсирующей вентиляции эффективность осаждения составляет уже 73% (15,5 мин). Эффективность комбинированного метода по отношению к методу осаждения орошением (с учетом анализа эксперимента пылеосаждения весовым методом) –

37,5%, что доказывает актуальность применения метода пульсирующей вентиляции для процессов по осаждению пыли.

Увеличение диаметра форсунки (до 15 мкм и до 20 мкм) при осаждении пыли ППЖК орошением снижает эффективность осаждения в сравнении с самоосаждением пыли до 28,5% и 28,4% соответственно. Время осаждения пыли при использовании форсунки на 15 мкм составляет 2440 с., а на 20 мкм – 2445с. Однако при использовании комбинированного режима (орошение и пульсация) эффективность осаждения пыли ППЖК, с использованием форсунок на 15 и 20 мкм составляет 63,4% (20,8 мин) и 38,5% (35 мин) соответственно.

Проведённое численное моделирование подтвердило адекватность разработанной расчётной модели и воспроизводимость экспериментальных данных. Анализ динамики снижения концентрации аэрозольных частиц показал влияние основных параметров комбинированного метода пылеосаждения — диаметра сопла форсунки, частоты пульсирующего устройства и расхода воздуха.

Сравнительный анализ кривых продемонстрировал, что оптимальными условиями для проведения процесса являются: диаметр сопла форсунки ≈ 10 мкм, частота пульсирующего устройства ≈ 13 Гц и расход воздуха в диапазоне от 90-104 м³/ч. Указанные параметры обеспечивают наибольшую устойчивость процесса осаждения и минимальное время достижения нулевых значений концентрации аэрозоля, что позволяет рассматривать их в качестве оптимальных для практического применения метода.

Исследуемый в работе метод осаждения пыли имеет более широкую возможность применения в тех местах технологического процесса, где требуется использование наименьшего количества жидкости. Благодаря комбинированному методу возможно повысить эффективность технологии «Сухого тумана», снизить стоимость используемого оборудования для пылеосаждения орошением, а также уменьшить потребление ПАВов. Внедрение исследуемого в работе метода пылеосаждения в систему вентиляции способно повысить ресурс фильтров, а возможно и полностью отказаться от их использования.

Представленные параметры 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. Таким образом, надежность технологического оборудования повышается, снижая аварийность.

Список литературы

1. Подрезов, А.В. Очистка газов от мелкодисперсной пыли [Текст] /А.В. Подрезов и др. //Экология и промышленность России, 2004, №11, с. 20-22.
2. Инженерная защита окружающей среды. Учебное пособие [Текст] / под ред. Воробьева О.Г. – СПб.: изд. Лань, 2002. – 288 с.3.
3. Юсфин, Ю.С. Ресурсно-экологическая оценка аглодоменного производства [Текст] /Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Сталь, №4, 2001, 1-5 с
4. Кузнецова Д.А. Оптимизация параметров орошения при различных производственных процессах, сопровождающихся пылевыведением, в зависимости от свойств выделяющейся в рудничную атмосферу пыли // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016 - №4 – С. 74 – 82.
5. Халаимова, И.В. Снижение пылевых выбросов при производстве кокса [Текст] /И.В. Халаимова, В.В. Кочура //Материалы XXI Всеукраинской научной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей природной среды и рациональное использование природных ресурсов». Т.2 – Донецк, ДонНУ, 2010. с.168-169.
6. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
7. Казюта, В. И. Утилизация пыли металлургических производств и отработанных фильтровальных материалов / В. И. Казюта // Сталь. – 2014. – № 9. – С. 95-102.
8. Борьба с пылью в металлургической промышленности [Электронный ресурс] // ГБУЗ "Новокузнецкий клинический противотуберкулезный диспансер". 2023. 23.05.2023 URL:<https://nvkz-tub.ru/blog/borba-s-pylyu-v-metallurgicheskoy-promyshlennosti.html> (дата обращения: 24.05.2023).

9. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 962(4), 042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>.
10. Егорова, А. М. Гигиенические факторы риска здоровью работников при получении железорудных окатышей / А. М. Егорова, Л. А. Луценко, Т. К. Татьянюк // Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. – 2021. – Т. 29, № 8. – С. 15-20. – DOI 10.35627/2219-5238/2021-29-8-15-20. – EDN XLRXNM.
11. Большина Е.П. Экология металлургического производства: Курс лекций. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. – 155 с.
12. Чеботарев, А. Г. Комплексная оценка условий труда и состояния профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий / А. Г. Чеботарев, Д. Д. Семенцова // Горная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 114-119. – DOI 10.30686/1609-9192-2021-1-114-119. – EDN UBONQD.
13. Опытнo-промышленный эксперимент по производству высокоосновного агломерата в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода / Г. С. Бобылев, А. Г. Коваленко, В. П. Падалка [и др.] // Металлург. – 2020. – № 8. – С. 14-20. – EDN JPCAU1.
14. Попов, А. Т. Теоретические основы оптимизации процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината / А. Т. Попов, О. А. Сулова, Е. А. Воронкова // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2020. – № 2(43). – С. 36-40. – DOI 10.53015/23049235_2020_2_36. – EDN CUIDGG.
15. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. 424 с.. ISBN 978–5–7508–2350–5
16. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва:

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с. ISBN 978–5–7508–2132–7

17. Состояние условий труда работников организаций по субъектам Российской Федерации (на конец 2024 года)

[https://70.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Состояние%20условий%20труда%20работников%20организаций%20по%20отдельным%20видам%20экономической%20деятельности%20\(на%20конец%202024%20г.\).pdf](https://70.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Состояние%20условий%20труда%20работников%20организаций%20по%20отдельным%20видам%20экономической%20деятельности%20(на%20конец%202024%20г.).pdf) (дата обращения: 17.10.2025).

18. Результаты мониторинга состояния условий и охраны труда в Российской Федерации в 2024 году

<https://s.vcot.info/document/poleznoe/media/5/68c7d53435b03351230838.pdf> (дата обращения: 17.10.2025).

19. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году.

<https://ammicrob.ru/upload/medialibrary/ba3/2yoqtxicsk1hnlta9uw8biyg240z3j4.pdf> (дата обращения: 17.10.2025).

20. Совершенствование природоохранных технологий и средств для пылеподавления поверхностей хвостохранилищ горно-металлургического производства / В. И. Ляшенко, А. А. Гурин, А. В. Шевченко, И. А. Лисовой // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 12(1428). – С. 15-27. – EDN YPWBZZ.

21. Гурин, А. А. Природоохранные технологии пылеподавления на хвостохранилищах горно-металлургического производства / А. А. Гурин, Н. В. Домничев, В. И. Ляшенко // Экология и промышленность. – 2010. – № 4(25). – С. 24-30. – EDN CRCHCX.

22. Корнев, А. В. Методические подходы к обоснованию и выбору мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных и подготовительных забоях угольных шахт / А. В. Корнев, А. А. Мешков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S23. – С. 3-19. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-6-23-3-19.

23. Улучшение системы орошения на предприятиях горнорудной промышленности / Н. П. Несмеянов, Е. Б. Александрова, В. А. Белогулов, В. А. Крылов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : Межвузовский сборник статей / Под редакцией В.С. Богданова. Том Выпуск XVII. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 257-259. – EDN GHZVAB.
24. Вишневская Е.П., Николаев А.А., Добрякова Н.Н., Банников А.А. Методы оценки смачиваемости углей растворами для пылеподавления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 17-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-17-25.
25. Оценка эффективности гидрообеспыливания по снижению выбросов пыли от неорганизованных источников / Ю. В. Горлов, В. Н. Игнатов, Д. Ю. Горлов, И. Ю. Шум // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 11-14. – EDN SXWTUH.
26. Крашук, Д. А. Мероприятия по пылеподавлению при перевалке угля на морском терминале АО «Дальтрансуголь» / Д. А. Крашук // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур : Материалы XII научно-практической конференции с международным участием, Хабаровск, 24 апреля 2023 года / Редакционная коллегия: А.В. Абузов (ответственный редактор) [и др.]. Том Выпуск 12. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2023. – С. 149-153
27. Лемехова А. А., Пендюрин Е. А. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ //Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. – 2021. – С. 92-96.
28. Писарев, В. С. Методы борьбы с пылью на карьерных дорогах / В. С. Писарев, А. А. Басаргин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 15-21. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-15-21. – EDN JXNORA.

29. Saurabh K. et al. Intelligent dry fog dust suppression system: an efficient technique for controlling air pollution in the mineral processing plant //Clean Technologies and Environmental Policy. – 2022. – С. 1-15.
30. Wei Y. et al. Application of genetic fuzzy Smith PID in water pressure control of dry fog dust removal //Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Control and Intelligent Robotics. – 2022. – С. 325-330.
31. Технология "Сухой туман" - самая эффективная система пылеподавления в мире! // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 34. – EDN SSECUJ.
32. Pal R. et al. Investigation on Impact of Dust Emission in Work and Buffer Zones of Iron Ore Processing Plant and its Management //Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. – 2024. – Т. 29. – №. 4. – С. 353-374.
33. Susanto A. et al. Tinjauan Efisiensi Pengendalian Debu dengan Dry Fog System di Industri Pengolahan Bijih Mineral //Jurnal Ilmu Lingkungan. – 2024. – Т. 22. – №. 3. – С. 712-719.
34. Лабораторные исследования дисперсности аэрозоля для механизированной обработки растений / И. Н. Горячкина, А. И. Ликучев, Д. М. Юмаев [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 85-93. – DOI 10.36508/RSATU.2022.94.92.011. – EDN WFYRXI.
35. Хавана А. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «СУХОЙ ТУМАН» ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПЫЛЕНИЯ КЛИНКЕРА ПРИ ЕГО ПОГРУЗКЕ НА ООО «АЧИНСКИЙ ЦЕМЕНТ» //Молодой учёный. – 2023. – С. 52-54.
36. Бахриддинова Н. М. и др. Основные мероприятия по снижению вредных выбросов в атмосферу //Ijodkor O'qituvchi. – 2022. – Т. 2. – №. 24. – С. 260-263.
37. Беспалов, В. И. Анализ преимуществ реализации пенного способа обеспыливания воздуха на предприятиях строительной отрасли / В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Экономика и экология территориальных образований. – 2015. – № 4. – С. 64-68. – EDN VDACHL.

38. Беспалов В. И., Гурова О. С. Обоснование применения пены для пылеподавления на конвейерных линиях предприятий строительной индустрии //Иновационная наука. – 2015. – №. 11-2. – С. 16-17.
39. Chen X., Hu H., Xu Y., Zhang Y., Yang G. Experimental investigation of foam dedusting agent in underground coal mine // Materials Research Innovations. 2015, vol. 19(S8), pp. 508–511. DOI: 10.1179/1432891715z.0000000001736.
40. Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Пылеподавление пеной на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № S13. — С. 221—226.
41. Скопинцева О. В., Вертинский А. С., Иляхин С. В., Савельев Д. И., Прокопович А. Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 17–20.
42. Давыдов С. Я., Валиев Н. Г., Суслов Н. М., Сёмин А. Н., Ермолаев А. И. Пылеобразование и использование пыли горных пород на промышленных объектах // Известия УГГУ. – 2016 - Вып. 3 (43). - С. 87-90.
43. Самохвалов Н. М., Виноградов В. В. Эффективность очистки газа от пыли в щелевом фильтре //Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т. 12. – №. 2 (41). – С. 339-348.
44. Тетерев Н.А. и др. Способы конденсационного укрупнения и осаждения мелкодисперсной пыли //Безопасность технологических процессов и производств: Труды Б 40 IV Международной научно-практической конференции. 7 апреля 2022 г., г. – 2022. – С. 84.
45. Ведерников С. А., Романюк Е. В. Инерционные пылеуловители с пониженной пожарной опасностью //Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов. – 2023. – С. 107.
46. Ведерников С. А., Романюк Е. В., Рассадников Д. Н. Разработка и использование инерционных пылеуловителей для взрывопожароопасных

производств //Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – №. 4 (49). – С. 129-135.

47. Бахронов Х. Ш., Ганиева С. У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2022. – №. 2. – С. 33-38.

48. Хабибуллин Б. Р. Численное исследование газодинамики в мультивихревом сепараторе //Наука, Образование, Инновации: Актуальные вопросы и современные аспекты. – 2022. – С. 13-15.

49. Средства защиты воздушного бассейна: учебное пособие [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-119.pdf

50. Степкина М. Ю., Кудряшова О. Б., Антонникова А. А. Скорости осаждения мелкодисперсных аэрозолей в акустическом и электрическом поле //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №. 3. – С. 62-68.

51. Степкина М. Ю., Кудряшова О. Б., Галахов А. Н. Осаждение аэрозольных сред под действием электрического и акустического поля //Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-38-10051. – 2018. – С. 234.

52. Лисин, П. А. Энергетическая оценка процесса пылеулавливания в циклонных аппаратах / П. А. Лисин, Е. А. Молибога, Д. Б. Мартемьянов // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2013. – № 2(10). – С. 73-78. – EDN SYNSJR.

53. Ерошенко, В. Г. Новая технология очистки газа в электрофильтрах 21 века / В. Г. Ерошенко // Экология и промышленность. – 2019. – № 1(58). – С. 12-16. – EDN NQMНМК.

54. Фадин Ю. М. и др. Возвратно-поточные циклоны. Истоки возникновения и направления совершенствования //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 5. – С. 104-109.

55. Романюк Е. В., Каргашилов Д. В., Некрасов А. В. Модернизация циклонов для повышения эффективности пылеулавливания //Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – №. 5. – С. 18.
56. Муродов О. Ж., Адилова А. Ш., Саидова Н. А. Анализ влияния на изменение эффективности очистки геометрических параметров циклонов //Молодежь и наука: шаг к успеху. – 2022. – С. 393-396.
57. Шуваев М. Р., Катин В. Д. Разработка новой конструкции батарейного циклона для угольных котельных //ББК У9 (2Рос. 255)-55я54 Н 346 Редакционная коллегия. – 2020. – С. 275.
58. Generalization of the aerodynamic characteristics of the cyclone and vortex chambers during their functioning / I. Pitak, V. Shaporev, O. Pitak [et al.] // Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol. 2, No. 3(40). – P. 26-34. – DOI 10.15587/2312-8372.2018.128043. – EDN XOGHRJ.
59. Василевский М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография/ М.В. Василевский – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.–258 с
60. Сергина, Н. М. К вопросу о выборе пылеулавливающего оборудования для деревообрабатывающих производств / Н. М. Сергина, Л. С. Панжева, С. Д. Лабутина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 1(90). – С. 183-193.
61. Жалюзийные пылеотделители [Электронный ресурс] // НПФ «МЕТАЛЛУМ» [URL:https://www.metallum.com.ua/blog/raznoe/zhalyuzijnyie-pyileotdeliteli](https://www.metallum.com.ua/blog/raznoe/zhalyuzijnyie-pyileotdeliteli) (дата обращения:05.02.2025)
62. Дмитриева Д. В. Воздействие предприятий угольной промышленности на атмосферный воздух в кемеровской области //Современные тенденции развития науки и производства. – 2017. – С. 40-44.

63. Лукашова Н. В. Многогранность функций системы озеленения городских территорий //Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2017. – С. 3624-3627.
64. Додеус, М. Эстетика в городских средствах инженерной защиты / М. Додеус // Инженерная защита. – 2015. – № 1(6). – С. 52-58. – EDN TMGSDB.
65. Занина И. А., Кубышко М. Г. Проблемы озеленения городов //Инновационные технологии в науке и образовании. – 2018. – С. 63-66.
66. Даниленко Л. П., Дзоз Е. А., Сотникова П. А. Экологические проблемы в строительной индустрии: методы сокращения негативных выбросов в атмосферу при строительных работах. – 2023.
67. Ангапова Н. В., Иванова А. С. Современное состояние и перспективы развития системы зеленых насаждений в г. Улан-Удэ //Земельные и водные ресурсы: мониторинг эколого-экономического состояния и модели управления. – 2015. – С. 72-75.
68. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: монография / И. Л. Бухарина, Т. М. Поварнищина, К. Е. Ведерников. – Ижевск : ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. – 216 с.
69. Демура Д. Т., Швед А. А. Вертикальное озеленение для создания экологического каркаса. – 2021.
70. Рекомендации по озеленению автомобильных дорог / Ю. Н. Розов, С. Ю. Розов, С. И. Костенко, Г. Д. Вороненков // Дороги и мосты. – 2015. – № 2(34). – С. 8. – EDN WAXVET.
71. Иванов И. И., Иванова М. Г. Система озеленения территорий как фактор улучшения качества городской среды и повышения привлекательности региона для проживания //Теория и практика стратегирования. – 2022. – С. 211-221.
72. Плешкова Е. С., Шарапов А. И. Реконструкция местной вытяжной системы вентиляции для сталелитейного цеха //Современные материалы, техника и технология. – 2020. – С. 282-284.

73. Галкина Н. И. Надежность работы систем местной вытяжной вентиляции // Вестник евразийской науки. – 2013. – №. 5 (18). – С. 120.
74. Филин А.Э., Овчинникова Т.И., Зиновьева О.М., Меркулова А.М. Развитие пульсирующей вентиляции в горном производстве // Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 67—71. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.13. — № 5. — С. 31—33.
75. Ушаков К.З. Косарев В.Д. Филин А.Э. Теория и практика пульсирующей вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2000 – № 1 - С. 225 – 228.
76. Одинцов А. А. Современное состояние технологии производства железорудного агломерата в отечественной металлургии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2022. – №. 3 (41). – С. 28-36.
77. Haque N. Life cycle assessment of iron ore mining and processing // Iron Ore. – Woodhead Publishing, 2022. – С. 691-710.
78. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing, Andrew B. Andrew B. Cecala, Andrew D. Andrew D. O'Brien, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015 – P. 312
79. Математическая модель агломерации твёрдой дисперсной фазы в циклоне с жидкостно-капельным орошением / И. А. Саранов, Г. О. Магомедов, В. И. Ряжских, С. В. Шахов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 4(70). – С. 49-55. – DOI 10.20914/2310-1202-2016-4-49-55.
80. Фукс Н. А. Механика аэрозолей [Текст] / Акад. наук СССР. Ин-т науч. информации. - Москва : Изд-во Акад. Наук СССР, 1955. - 352 с. : ил.; 27 см.
81. Динамика аэрозолей в горных выработках [Текст] / А. С. Бурчаков, Э. М. Москаленко ; Акад. наук СССР. Моск. о-во испытателей природы. Секция физики. - Москва : Наука, 1965. - 68 с. :
82. Руководство по проектированию и практическому осуществлению противопылевых вентиляционных режимов в металлических рудниках [Текст] / В. Н. Воронин, Л. Д. Воронина, А. Д. Багриновский ; Под науч. руковод. акад. А. А.

Скочинского ; Ин-т горного дела Акад. наук СССР. - Москва : Госгортехиздат, 1960. - 203 с.

83. Скочинский А. А. Рудничная вентиляция [Текст] : [Учебник для специальности "Разработка месторождений полезных ископаемых"] / Акад. А. А. Скочинский, проф. В. Б. Комаров. — 3-е изд. — Москва : Углетехиздат, 1959. — 632 с.

84. Взрывоопасность угольных шахт [Текст] / А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанов, О. В. Смирнов ; Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК). — Москва : Горное дело, 2011. — 262 с

85. Воздух в шахте Трактат о проветривании угольных шахт / Ф. С. Клебанов; [Рос. акад. естеств. наук, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, Рос. угольная компания]. — Москва : Изд. дом "Имидж", 1995. — 574 с

86. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст] / А. И. Ксенофонтова, А. С. Бурчаков. — Москва : Недра, 1965. — 231 с.

87. Ушаков, К. З. А.А. Скочинский в Московском горном / К. З. Ушаков, Н. О. Каледина // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 8. – С. 9-12. – EDN JVVYNB.

88. Каледина Н., Кобылкин С. Расчёт аэродинамических параметров выработанных пространств. – М.: Издательство «Горная книга», 2015. – 44 с.

89. Исследование потерь воздуха в параллельных выработках [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гор. инж. М. А. Патрушев ; М-во высш. образования СССР. Ленингр. орденов Ленина и Труд. Красного Знамени горный ин-т им. Г. В. Плеханова. - Ленинград : [б. и.], 1957. - 22 с

90. Скопинцева, О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт / О. В. Скопинцева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S7. – С. 315-325.

91. Скопинцева, О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах : специальность 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Скопинцева Ольга Васильевна. – Москва, 2012. – 379 с.
92. Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. М.: Недра. -1979.-208 с.
93. Установка для подавления пыли в местах перегрузки угля / П. М. Дунаевская, А. В. Белов, С. П. Чечевишников, В. М. Смолин // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 1. – С. 37-38. – EDN JVVTDV.
94. Авторское свидетельство № 1273605 А1 СССР, МПК E21F 5/00. Пылеподавляющая установка : № 3952545 : заявл. 04.07.1985 : опубл. 30.11.1986 / В. П. Афанасьев, В. И. Еремеев, В. А. Кучуков ; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЗОЛОТА И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ. – EDN UPGSVK.
95. Курмазова, Н. А. Использование пылеподавляющих устройств на угольном разрезе (на примере разреза "Восточный" Забайкальского края / Н. А. Курмазова // Наука и бизнес: пути развития. – 2015. – № 3(45). – С. 59-62. – EDN TWBISB.
96. Пульсирующая вентиляция и металлургическое производство: перспектива применения / А. Э. Филин, Ю. Г. Клыков, Л. В. Сорокер, В. В. Вернигор // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S12. – С. 43-47. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-4-12-43-47. – EDN XUZFVJ.
97. Кобылкин А. С. Обоснование параметров систем вентиляции горных выработок при их проходке с использованием пульсирующего режима проветривания : дис. – Московский государственный горный университет, 2012.
98. Гольшев А. М., Задорожный С. И., Логачев И. Н. Исследование рассеивания пыли от неорганизованных источников фабрик окомкования железной руды //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – №. 2. – С. 163-166.

99. Авторское свидетельство № 1238779 А1 СССР, МПК В01D 50/00, В01D 35/06. Устройство для предотвращения образования пыли при конвейерной перегрузке сыпучих материалов : № 3705270 : заявл. 28.02.1984 : опубл. 23.06.1986 / И. Н. Логачев, Л. М. Черненко, А. М. Голышев [и др.] ; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. – EDN VKYAGY.
100. Логачев И. Н., Логачев К. И. Характеристика пылевых выбросов при перегрузках сыпучих материалов и борьба с ними //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2009. – №. 3. – С. 163-167.
101. Гилева, Ю. М., Адриановский, В. И., Липатов, Г. Я., Лестев, М. П.и др. Результаты изучения пылевого фактора при обогащении медьсодержащего сырья //Фундаментальные исследования. – 2011.
102. К вопросу оценки условий труда рабочих, занятых в обогащении медьсодержащих руд / В. И. Адриановский, Ю. М. Гилева, Г. Я. Липатов, С. Ю. Поплавских // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 12. – С. 30-31. – EDN MVDPYJ.
103. Саплинов, Л. К. Способы предотвращения пылевыделения при подготовке шихтовых материалов на фабриках ГОКов : специальность 05.26.01 "Охрана труда (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Саплинов Леонид Константинович. – Кривой Рог, 1984. – 209 с. – EDN NPOOMB.
104. Энтин, С. В. Развитие аэродинамических энергосберегающих способов повышения эффективности пылеуловителей в производстве конструкционных огнеупорных материалов : специальность 05.23.03 "Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Энтин Сергей Владимирович. – Воронеж, 2005. – 213 с. – EDN NNGSXB.

105. Ровин С. Л. Влияние дисперсности материалов на скорости процессов твердофазного восстановления //Литьё и металлургия. – 2014. – №. 4 (77). – С. 7-9.
106. Ровин С. Л., Курач Д. И., Григорьев С. В. Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей //Литьё и металлургия. – 2023. – №. 1. – С. 73-78.
107. Курносов И. Ю., Филин А. Э., Тертычная С. В. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата //Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – Т. 8. – №. 1. – С. 41-49.
108. «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.
109. Дмитриенко А.О., Макушова Г.Н., Пожаров М.В. Теория рентгенофазового анализа. Учебно-методическое пособие. – Электронный ресурс. - 2016. - 51 с.
110. Исупов А. С. Рентгенофазовый анализ оксида железа, механически обработанного в шаровой мельнице //Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 9-11 ноября 2021 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2021. – С. 41-44.
111. Павлов, В. В. Восстановление порошка железорудного концентрата в состоянии пылегазовой взвеси / В. В. Павлов, Д. В. Горбачев // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2023. – № 1. – С. 22-29. – DOI 10.54826/19979258_2023_1_22. – EDN HQNIBV.
112. Дмитрак Ю. В. Оборудование для тонкого измельчения горных пород //Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве. – 2021. – С. 62-66.
113. Авторское свидетельство № 1278025 А1 СССР, МПК В02С 25/00. Способ управления процессом сухого измельчения и сепарации пыли : № 3931084 : заявл.

18.07.1985 : опубл. 23.12.1986 / Л. Б. Шулакова ; заявитель ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ.АРТЕМА. – EDN СННWRX.

114. Обеспыливание воздуха на фабриках горнообогатительных комбинатов, М., «Недра», 1972 184 с. Авт.: И. И. Афанасьев, В. С. Ващенко, Г. С. Генералов и др.

115. ГОСТ 18318-94. Межгосударственный стандарт. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием. Введен: 01.01.1997. Минск – 11 с.

116. Определение гранулометрического состава дисперсных материалов: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Брус И.Д.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 12 с.

117. Straž G., Szostek M. The Use of a Laser Diffractometer to Analyze the Particle Size Distribution of Selected Organic Soils //Applied Sciences. – 2024. – Т. 14. – №. 18. – С. 8104. ISO 13320:2020 «Particle size analysis — Laser diffraction methods»

118. Методика оценки эффективности гидростатического дробления породы по результатам микроскопического анализа ее гранулометрического состава / И. С. Костюк, К. И. Соколов, А. А. Подрухин, Н. В. Хашеватская // Проблемы горного давления. – 2022. – № 1-2(42-43). – С. 137-151. – EDN ANESKT.

119. Абрамов, А. В. Рентгенофлуоресцентный анализ : учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 18.03.01 «Химическая технология», 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики», 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов» / А. В. Абрамов, А. А. Пупышев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 96 с. – ISBN 978-5-7996-2166-7. – EDN ZGEOHN.

120. Курносов, И. Ю. Повышение эффективности массопереноса аэрозолей горнодобывающего производства методом пульсации / И. Ю. Курносов // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 427-430. – EDN SRRUMI.

121. 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.

122. Филин А.Э. Метод пульсирующей вентиляции для дезинтеграции скоплений метана в горных выработках угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2006 – С. 241 -246.

123. Филин А.Э. Перспективы обеспечения безопасности горного производства // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016.

124. Филина, В. А. Пути повышения эффективности пылеподавления орошением / В. А. Филина, А. Э. Филин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S14. – С. 3-10. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-5-14-3-10. – EDN QXWXTI.

125. 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.

126. Дудкин, Н. И. Измерение массовой концентрации аэрозолей / Н. И. Дудкин, И. С. Адаев // Мир измерений. – 2007. – № 11. – С. 37-40. – EDN PGQNDL.

127. Берсенов, И. С. Особенности анализа микроструктуры железорудных агломерата и окатышей / И. С. Берсенов // Наука и производство Урала. – 2021. – Т. 17. – С. 2-3. – EDN ACBBYV.

128. Мацукевич, И. В. Разделение железо- и цинксодержащих компонентов пыли газоочисток электросталеплавильных производств / И. В. Мацукевич, Н. В. Кулинич, В. В. Тавгень // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 203-210. – DOI 10.29235/1561-8331-2022-58-2-203-210. – EDN JQVSVV.
129. Manabe, T. Introduction of Steelmaking Process with Resource Recycling / T. Manabe, M. Miyata, K. Ohnuki // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2019. – Vol. 5, No. 3. – P. 319-330. – DOI 10.1007/s40831-019-00221-1. – EDN NLJURN.
130. Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах / А.Э. Филин, С.В. Тертычная, И.Ю. Курносков и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.
131. Кретова, О. А. Статистическая обработка результатов эксперимента методом Стьюдента / О. А. Кретова, Р. В. Копылов, В. Ф. Панова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения, Новокузнецк, 04–07 мая 2010 года / Под общей редакцией Л.П. Мышляева. Том IV. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2010. – С. 66-68. – EDN SWOUSR.
132. Анализ неорганизованных пылевых выбросов в атмосфере города от электросталеплавильного цеха / Е. А. Калюжина, А. А. Сахарова, Е. Ю. Козловцева [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2(49). – С. 171. – EDN MAJQBV.
133. Корнев А.В., Ледяев Н.В., Кабанов Е.И., Корнева М.В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.
134. Павлов, В. В. Восстановление порошка железорудного концентрата в состоянии пылегазовой взвеси / В. В. Павлов, Д. В. Горбачев // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2023. – № 1. – С. 22-29. – DOI 10.54826/19979258_2023_1_22. – EDN HQNIBV.
135. Лимановская, О. В. Основы машинного обучения : учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлениям подготовки: 09.03.04 —

Программная инженерия; 09.03.03 — Прикладная информатика; 02.04.02 —
Фундаментальная информатика и информационные технологии; 09.04.02 —
Информационные системы и технологии / О. В. Лимановская, Т. И. Алферьева ;
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский
федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. –
Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина, 2020. – 88 с. – ISBN 978-5-7996-3015-7. – EDN YLJQGT.

136. Ростовцев, В. С. Искусственные нейронные сети : учебник / В. С. Ростовцев.
– Киров : Вятский государственный университет, 2014. – 208 с. – EDN YMKOXD.

137. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному
управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья
/ А. Ю. Пучков, М. И. Дли, Н. Н. Прокимнов, Д. Ю. Шутова // Прикладная
информатика. – 2022. – Т. 17, № 6(102). – С. 102-121. – DOI 10.37791/2687-0649-
2022-17-6-102-121. – EDN CDLNVP.

138. Теория и практика машинного обучения : Учебное пособие / В. В. Воронина,
А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святков. – Ульяновск : Ульяновский
государственный технический университет, 2017. – 290 с. – ISBN 978-5-9795-1712-
4. – EDN QNQXJP.

139. Random Forests: сайт. URL:
<https://www.math.mcgill.ca/yyang/resources/doc/randomforest.pdf> (дата обращения
01.04.2025)

140. Decision Trees, Bagging, Boosting, Random Forest and Extra-Trees : сайт. URL:
[https://static1.squarespace.com/static/5a4c161cfe54ef45b17aa18e/t/5aad71c570a6adbf5
4a763b5/1521316297439/decisiontree-randomforest.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5a4c161cfe54ef45b17aa18e/t/5aad71c570a6adbf54a763b5/1521316297439/decisiontree-randomforest.pdf)

141. Ponce-Bobadilla A. V. et al. Practical guide to SHAP analysis: Explaining
supervised machine learning model predictions in drug development //Clinical and
translational science. – 2024. – Т. 17. – №. 11. – С. e70056.

142. Johnson R.A. Applied multivariate statistical analysis / R.A. Johnson, D.W.
Wichern. – New York: Pearson. – 2017. – 800 p.

143. Everitt B. An introduction to applied multivariate analysis with R / B. Everitt, T. Hothorn. – New York: Springer. – 2018. – 274 p.
144. Информатика : учебно-методическое пособие / Д.Н. Соколовский, А.В. Резайкин, В.А. Телешев ; под общ. ред. Д. Н. Соколовского ; М-во здравоохранения РФ, Урал. гос. мед. ун-т. — Екатеринбург : УГМУ, 2024.— Загл. с титул. экрана. — ISBN 978-5-00168-073-4. — Текст. Изображения : электронные.
145. Попов, Евгений Александрович. Теория вероятностей. Базовые понятия и случайные величины = Probability theory. Basic concepts and random variable: учебное пособие / Е. А. Попов; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт электроники и телекоммуникаций, Высшая школа прикладной физики и космических технологий. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — 1 файл (1,24 Мб). — Загл. с титул. экрана. — Электронная копия печатной публикации. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение, печать). — <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/id25-10.pdf>>. — DOI [10.18720/SPBPU/2/id25-10](https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-10). — Текст: электронный
146. Баженова С.Г. Математико-статистические методы в горной промышленности; Учебн. пособие – 2-е изд., исправ. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – С. 39.
147. Ефимова А.И., Зотеев А.В., Склянкин А.А. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие. – М.: МГУ, Физический факультет, 2012.
148. Диденко, Л.Г., Керженцев, В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. Издательство: М. МГУ. 1977 г.
149. Яворский В. А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. Методические указания к лабораторным работам. Москва: Московский физико-технический институт (государственный университет). Факультет молекулярной и биологической физики. 2011.
150. Иверонова В. И., Физический практикум. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.

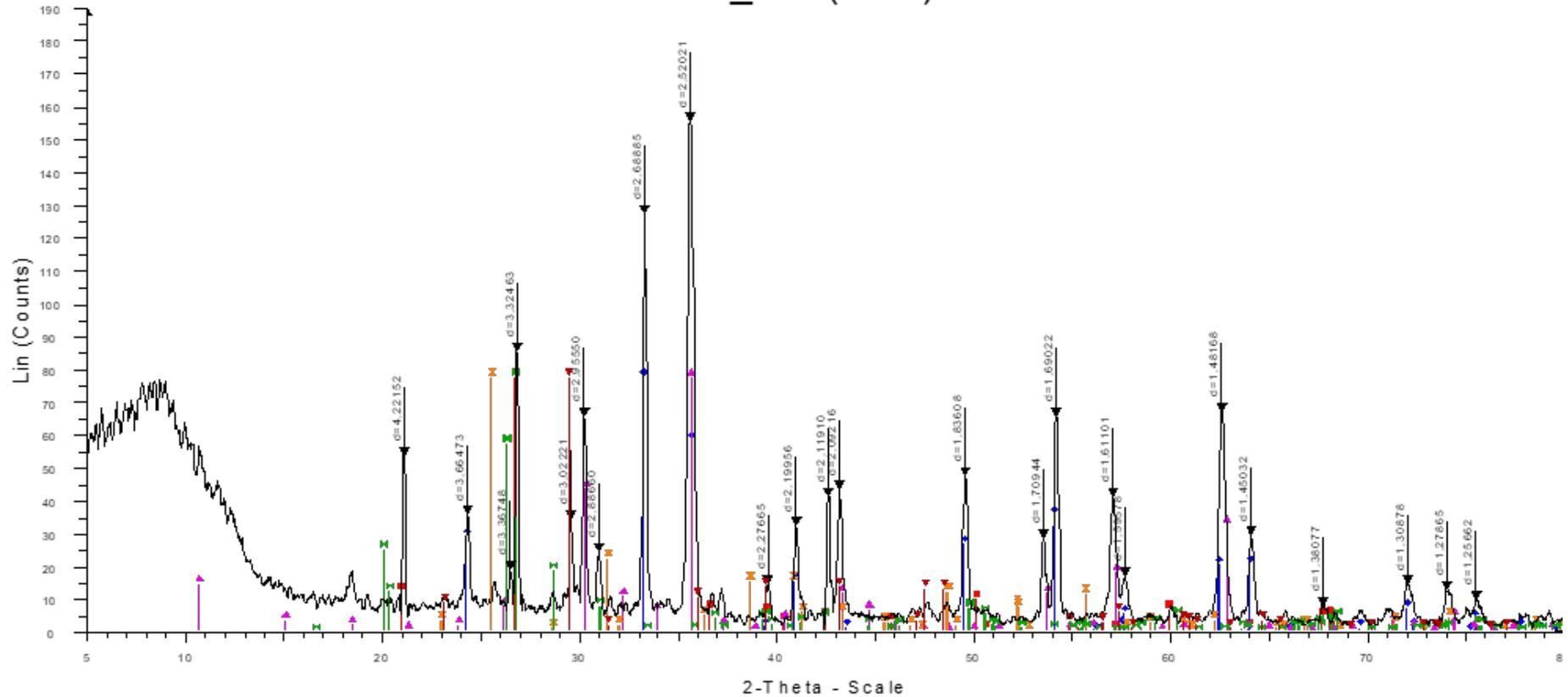
151. Митин И.В., Русаков В.С. «Анализ и обработка экспериментальных данных». Москва 1998
152. Основы научных исследований: практическое занятие № 11. Множественная корреляция [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие. – Режим доступа: [https://docs.yandex.ru/docs/view?url=yadisk%3A%2F%2F%2Fdisk%2FПрактика%2012.%20Множественная%20корреляция%20\(1\).pdf&name=Практика%2012.%20Множественная%20корреляция%20\(1\).pdf&uid=290627898&nosw=1](https://docs.yandex.ru/docs/view?url=yadisk%3A%2F%2F%2Fdisk%2FПрактика%2012.%20Множественная%20корреляция%20(1).pdf&name=Практика%2012.%20Множественная%20корреляция%20(1).pdf&uid=290627898&nosw=1) (дата обращения: 28.09.2025).
153. Горяников, Ю.В. Основы научных исследований в агрономии: учебное пособие для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 35.03.04 «Агрономия» / Ю.В. Горяников. – Черкесск: БИЦ СКГА, 2023. - 204с
154. Харин Ю.С. Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, М.С. Абрамович. – Минск : БГУ. – 2008. – 455 с
155. Математическое моделирование : Учебное пособие / Н. А. Коптева, В. Н. Литвинов, Н. М. Удинцова, Т. В. Жидченко. – зерноград : Азово-Черноморский инженерный институт - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственной аграрный университет" в г. зернограде, 2020. – 117 с. – EDN IFUOLK.

Приложения

Приложение 1

Рентгенофазовый анализ пыли на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата

JS-1_30 (D-8)



JS-1_30 (D-8) - File: JS-1_30 (D-8).raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.5 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1646266112 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: Operations: Smooth 0.150 | Import

00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO₂ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91344 - b 4.91344 - c 5.40524 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3221 (154) - 3 - 113.010 - I/IC PDF 3.

01-089-0599 (C) - Hematite, syn - Fe₂O₃ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 5.03200 - b 5.03200 - c 13.73300 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3c (167) - 6 - 301.146 - V

01-089-3850 (C) - Magnetite, syn - Fe₂HO₃ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 8.35000 - b 8.35000 - c 8.35000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Primitive - P-43m (215) - 1 - 582.183 - V/IC P

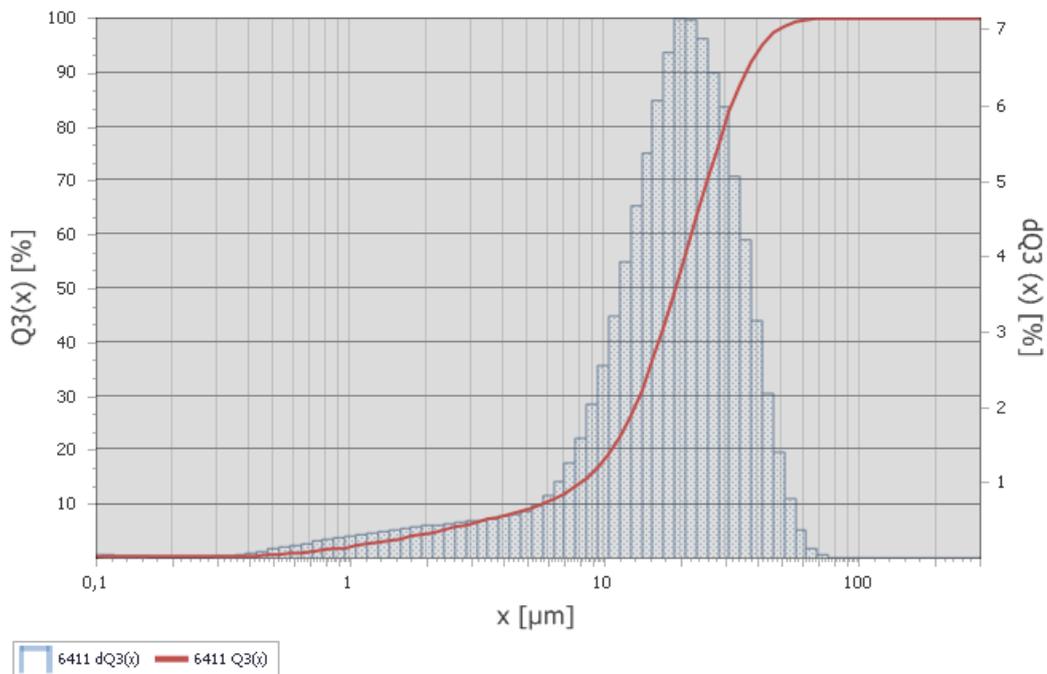
00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 4.98900 - b 4.98900 - c 17.06200 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3c (167) - 6 - 367.780 - I/IC

00-037-1496 (*) - Anhydrite, syn - CaSO₄ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 6.99330 - b 7.00170 - c 6.24110 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Base-centered - Bm b (63) - 4 - 305.595 - V

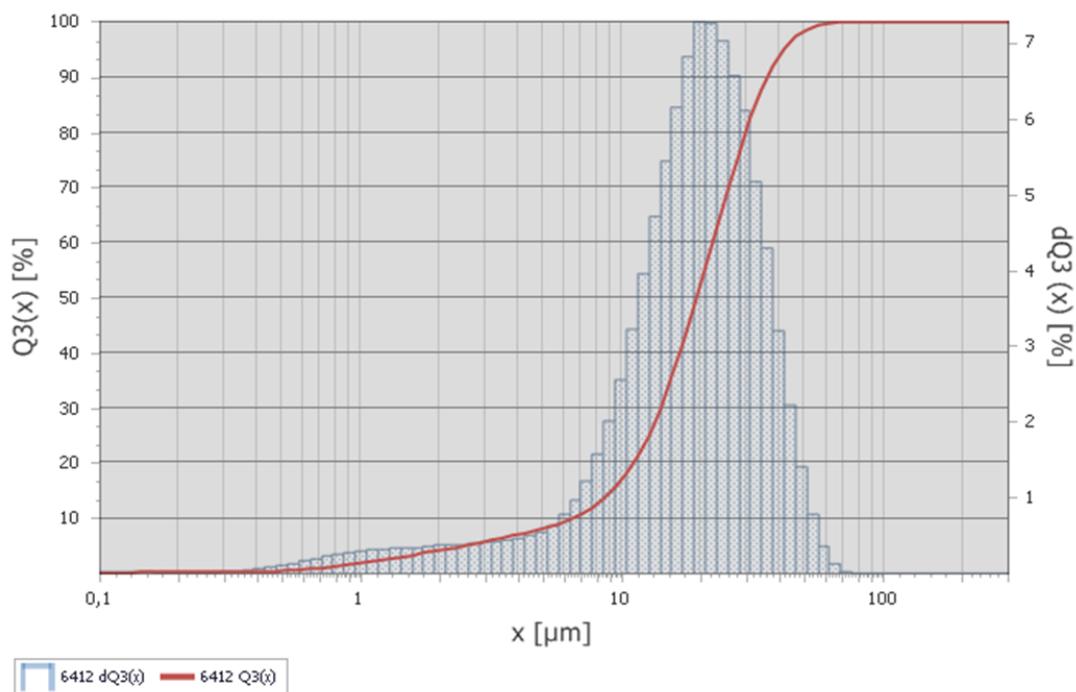
01-079-2403 (C) - Moganite - SiO₂ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.75800 - b 4.87600 - c 10.71500 - alpha 90.000 - beta 90.080 - gamma 90.000 - Body-centered - I2/a (15) - 12 - 457.573 - V/IC PDF

Результаты гранулометрических анализов пыли после измельчения и просеивания

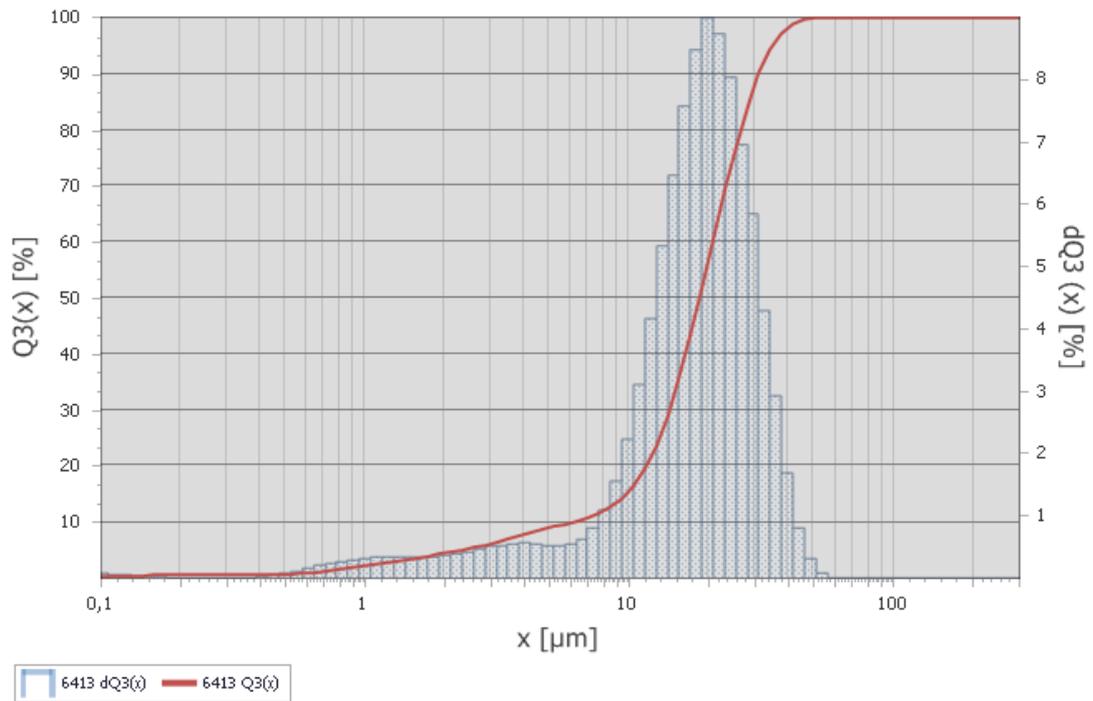
Анализ 1



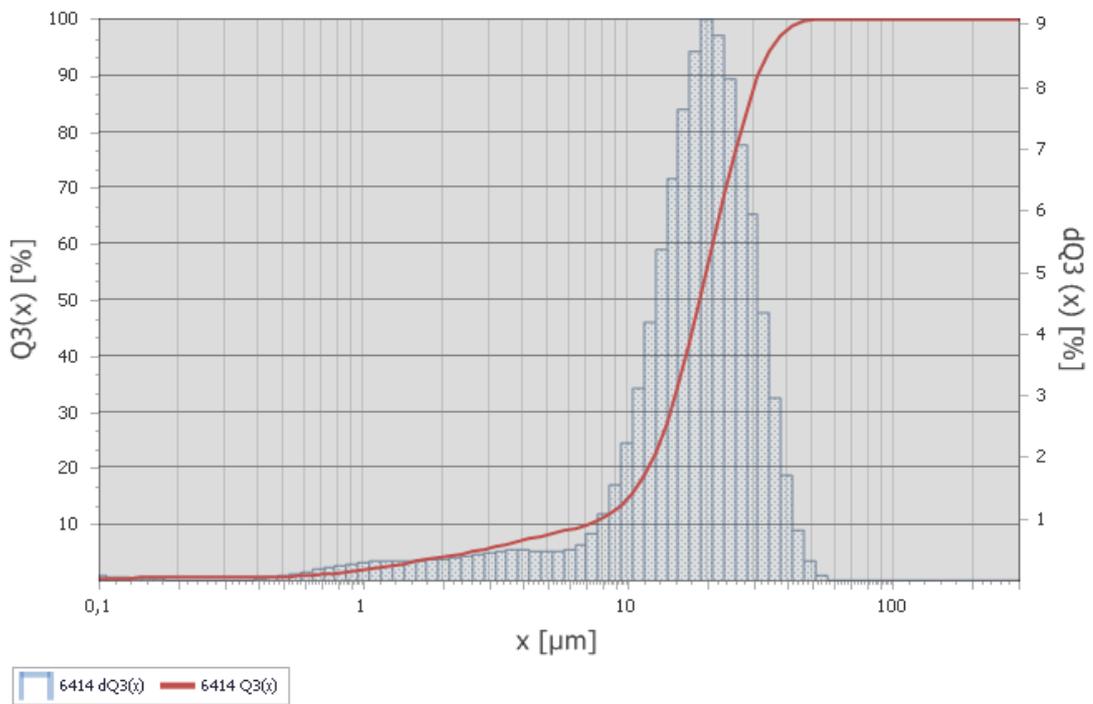
Анализ 2



Анализ 3



Анализ 4



Анализ 5

