

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет»
Министерства образования и науки РФ

На правах рукописи

ДЖИН Хевэй

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕУДАЛЕНИЯ
СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ**

**Специальность: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук,
Доцент Пономарев Н.С.

Санкт-Петербург – 2026

Оглавление

Введение.....	5
1 Аналитический обзор научных и технических достижений в области очистки воздушной среды сварочных цехов.....	11
1.1 Характеристики технологического процесса в сварочном цехе.....	11
1.1.1 Особенности проведения сварочных работ.....	11
1.1.2 Характеристики выделяющихся вредностей при выполнении сварочных работ.....	12
1.1.3 Взаимодействие сварочного аэрозоля с воздушными и тепловыми потоками	14
1.2 Анализ исследований общеобменной и местной вентиляции в сварочных цехах.....	19
1.2.1 Обзор методов и аппаратов очистки пылевоздушных потоков.....	20
1.2.2 Анализ способов подачи воздуха в сварочных цехах.....	34
1.2.3 Конструкции местных отсосов в сварочных цехах.....	38
1.3 Методы исследования.....	44
1.4 Выводы.....	46
2. Исследование эффективности систем общеобменной вентиляции в сварочном цехе.....	47
2.1 Исследование физических характеристик сварочного аэрозоля.....	47
2.1.1 Натурные исследования характеристик сварочного аэрозоля.....	47
2.1.2 Анализ физических факторов, влияющих на распространение сварочного аэрозоля.....	53
2.1.3 Численное моделирование процесса осаждения твердых частиц в воздухе...57	
2.2 Исследование эффективности общеобменной вентиляции для удаления сварочного аэрозоля.....	58
2.2.1 Разработка конструкции воздухораспределителя с вращающимися решётками.....	58
2.2.2. Численная модель воздухораспределителя с вращающимися решётками.....	60

2.3 Численная модель воздушного режима сварочного цеха при использовании общеобменной вентиляции.....	61
2.3.1. Влияние скорости на характеристики осаждения твердых частиц.....	62
2.3.2 Влияние диаметра частиц на характеристики осаждения твердых частиц.....	63
2.3.3 Влияние пористости на характеристики осаждения твердых частиц.....	65
2.3.4 Аппроксимация расчётных данных и нормированная оценка влияния факторов.....	67
2.4 Анализ результатов численного моделирования различных вариантов общеобменной вентиляции.....	69
2.4.1 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 1 (подача сверху– вытяжка снизу).....	71
2.4.2 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 2 (подача снизу – вытяжка сверху).....	73
2.4.3 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 2 (подача снизу – вытяжка сверху).....	74
2.5 Выводы.....	77
3. Разработка и исследование местной системы вытяжной вентиляции.....	79
3.1 Разработка новой передвижной водяной установки для улавливания пыли.....	79
3.1.1 Конструкция передвижной установки мокрого пылеулавливания с водяной ванной.....	79
3.1.2 Конструкция и принцип работы новой передвижной водяной пылеуловительной установки с аэратором.....	81
3.1.3 Конструкция и принцип работы новой передвижной водяной пылеуловительной установки с мешалкой.....	82
3.2 Численное исследование эффективности пылеулавливания.....	87
3.2.1 Расчетная модель и граничные условия.....	93
3.2.2 Визуализация фазового распределения (газовая фаза).....	100
3.3 Испытания базовой передвижной установки мокрого пылеулавливания (лопастное перемешивание).....	101
3.3.1 Методика и стенд для испытаний.....	101

3.3.2 Программа и планирование эксперимента.....	105
3.3.3 Анализ экспериментальных данных.....	105
3.4 Экспериментальное исследование новой передвижной установки комбинированного водяного пылеулавливания с мешалкой и орошением.....	109
3.4.1 Методика и стенд для испытаний.....	109
3.4.2 Программа и планирование эксперимента.....	112
3.4.3 Анализ экспериментальных данных.....	114
3.5 Выводы.....	115
4 Исследование воздушного режима с предлагаемыми усовершенствованиями вентиляции сварочного цеха.....	117
4.1 Численная модель воздушного режима.....	117
4.1.1 Структура комбинированной вентиляционной системы.....	118
4.1.2 Численная модель комбинированной вентиляционной системы.....	120
4.2 Результаты численного моделирования.....	123
4.2.1 Влияние положения сварки на эффективность захвата.....	123
4.2.2 Влияние защитного экрана на эффективность улавливания.....	124
4.3 Техничко-экономическая оценка эффективности систем вентиляции.....	127
4.3.1 Основа оценки и описание параметров.....	128
4.3.2 Калькуляция затрат и анализ экономической эффективности.....	131
4.3.3 Комплексная технико-экономическая оценка.....	134
4.4 Выводы.....	136
Заключение.....	137
Список литературы.....	139
Приложение А.....	156
Приложение Б.....	157
Приложение В.....	158
Приложение Г.....	159
Приложение Д.....	160
Приложение Е.....	161

Введение

Актуальность темы исследования. Сварка является одним из наиболее распространенных технологических процессов. Исследование процессов локализации взвешенных частиц сварочного аэрозоля имеет большое значение для обеспечения здоровых и безопасных условий труда работников. Количество работ, посвященных исследованию аэродисперсных систем весьма велико, однако в большинстве случаев рассматриваются стационарные сварочные посты. Наличие современных средств измерений и возможности математических методов моделирования определяют перспективы изучения газового и воздушного режимов сварочных цехов при нестационарных местах производства сварочных работ и способствуют разработке новых воздухораспределителей и пылеулавливающих устройств.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой послужили работы российских и зарубежных ученых: М.И. Гримитлина, А.М. Гримитлина, Г.М. Позина, О.Н. Зайцева, К.И. Логачева, В.Н. Посохина, В.М. Уляшевой, В.В. Шаптала, Е.Н. Попова, Д.В. Лобанова, Б.П. Новосельцева, J. Zhao, Y. Feng, M. Bezerra, J. Wang, Y. Xu, M. Zhang, S. Ma и других.

Рабочая гипотеза исследования – использование методов численного моделирования для обоснования новых конструктивных решений воздухораспределителей и фильтровентиляционных агрегатов с целью улучшения условий труда.

Цель работы заключается в совершенствовании воздушного режима сварочных цехов за счет использования высокоэффективных передвижных местных устройств для удаления твердых мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм (PM10) и предлагаемой конструкции воздухораспределителя для обеспечения нормативных требований к воздуху рабочей зоны.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ технических решений устройства систем вентиляции в сварочных цехах, выявить направления исследований;

2. Провести натурный эксперимент для определения дисперсного состава сварочных аэрозолей на рабочих местах сварщиков при использовании общеобменной вентиляции;

3. Усовершенствовать математическую модель распределения твердых частиц сварочного аэрозоля в сварочном цехе при использовании новой конструкции воздухораспределителя общеобменной системы приточной вентиляции;

4. Разработать конструкции высокоэффективных передвижных местных устройств очистки воздуха и лабораторный стенд для исследования эффективности предложенных устройств;

5. Усовершенствовать математическую модель очистки воздуха в местном передвижном агрегате;

6. Разработать рекомендации по проектированию систем вентиляции сварочных цехов.

Объект исследования – система вентиляции сварочного цеха.

Предмет исследования – процессы взаимодействия приточных струй и сварочных аэрозолей, улавливания взвешенных частиц.

Методологической основой Методология диссертационного исследования основана на положениях теории теплообмена и аэродинамики; использованы методы планирования эксперимента и математической статистики обработки результатов экспериментов, численного моделирования турбулентных течений.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п. 3 Разработка и совершенствование систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников

энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах.

Научная новизна исследования:

– установлена зависимость изменения концентраций сварочного аэрозоля от времени и размеров твердых частиц при использовании общеобменных систем вентиляции;

– разработана численная модель воздухораспределителя с вращающимися решетками для приточной вентиляции и выявлены зависимости концентрации твердых частиц размером менее 10 мкм (PM10) в сварочном аэрозоле при различных положениях вращающихся решеток;

– установлены зависимости площади контакта сварочного аэрозоля и воды при различных способах подачи и распределения воды в новой передвижной фильтровентиляционной установке;

– установлены зависимости эффективности пылеудаления для предлагаемых способов подачи воды от скорости на входе и частоты вращения мешалки.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении области применения мокрого способа очистки воздуха от сварочных аэрозолей в передвижном фильтровентиляционном агрегате.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается:

– в разработке новой конструкции воздухораспределителя с вращающимися решетками для общеобменной вентиляции и разработке рекомендаций для проектирования приточной вентиляции с использованием новой конструкции воздухораспределителя;

– в разработке конструкция высокоэффективного передвижного фильтровентиляционного агрегата с различными способами распределения воды для очистки воздуха от сварочных аэрозолей;

– во внедрении результатов в учебный процесс Хэнаньского университета городского строительства (Акт внедрения от 20.04.2026 г.), Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (Акт внедрения от 24.06.2026 г.); в практику компаний ООО «Пекин Хуанвэй Технологии» (Акт

внедрения от 17.04.2025 г.), ООО «Пиндиншань Чаоцин Экологические Технологии» (Акт внедрения от 21.11.2025 г.).

Положения, выносимые на защиту:

– численная модель воздухораспределителя с вращающимися решетками и зависимости концентрации PM10 в сварочном аэрозоле при различных положениях вращающихся решеток;

– численная модель процесса улавливания сварочного аэрозоля в новой передвижной фильтровентиляционной установке;

– экспериментальные зависимости площади контакта сварочного аэрозоля и воды для различных способов подачи и распределения воды в новой передвижной фильтровентиляционной установке;

– экспериментальные зависимости эффективности пылеудаления для предлагаемых способов подачи воды от скорости на входе и частоты вращения мешалки.

Достоверность результатов. Степень достоверности результатов соответствует опубликованным данным других авторов; подтверждена результатами численных, натурных и лабораторных исследований автора. Используются поверенные средства измерений и сертифицированное программное обеспечение. Отсутствуют противоречия с физической природой процессов. Результаты инженерных расчетов соответствуют экспериментальным данным.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и докладывались на всероссийских и международных конференциях: Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Инженерные системы и городское хозяйство» (СПбГАСУ, 2023); Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы развития Европейского Севера» (УГТУ, 2023); Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (СПбГАСУ, 2024); Национальном (всероссийском) симпозиуме «Численное моделирование в климатических системах» (СПбГАСУ, 2025); LXXIX

Международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (СПбГАСУ, 2025).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 4 печатных работах (2,13 п.л.) рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 161 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 6 приложений. Работа изложена на 155 страницах основного текста и 6 страниц приложений, содержит 10 таблиц, 81 рисунок и 53 формулы.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доценту СПбГАСУ Пономареву Н.С., за неоценимую помощь, постоянную поддержку, ценные советы и научное руководство на протяжении всего периода обучения и выполнения диссертационного исследования.

Особую благодарность автор выражает профессору СПбГАСУ Уляшевой Вере Михайловне за внимание к работе, профессиональные рекомендации и поддержку в процессе подготовки диссертации.

Автор также благодарит преподавателей и сотрудников кафедры ТГВ СПбГАСУ за переданные знания, помощь и поддержку в период обучения и научной деятельности.

Искренняя признательность выражается заместителю директора Харбинского технологического института (Чжэнчжоуский научно-исследовательский институт) Люй Чуньвану, декану факультета энергетического машиностроения Хэнаньского университета городского строительства Лю Хайянь, а также всем сотрудникам указанных организаций за содействие в выполнении научно-исследовательской работы и реализации научных проектов.

Отдельную благодарность автор выражает Правительству Российской Федерации за предоставленную возможность получения образования и проведения научных исследований в России, а также Правительству Китайской Народной Республики за стипендиальную поддержку, позволившую успешно завершить обучение и научную подготовку.

Особые слова признательности автор адресует своей семье, чья постоянная поддержка, понимание и вера в успех являлись важнейшим источником сил и вдохновения на протяжении всего периода обучения и научной деятельности.

1 Аналитический обзор научных и технических достижений в области очистки воздушной среды сварочных цехов

1.1 Характеристики технологического процесса в сварочном цехе

1.1.1 Особенности проведения сварочных работ

Сварочные работы широко применяются на различных производственных предприятиях (машиностроение, автомобилестроение, авиакосмическая промышленность, судостроение, ремонт и др.) [1–5]. Во время сварки работники подвергаются воздействию дыма и газов, образующихся в процессе [6, 7]. Уровень возможного воздействия зависит от используемого способа сварки и условий проведения работ [8]. Ручная сварка, полуавтоматическая, автоматическая, точечная, стыковая, контактная, роботизированная и газовая сварка являются наиболее распространёнными процессами в производстве и ремонте [9]. Контроль загрязнений и создание комфортных условий в сварочных цехах могут быть достигнуты за счёт сочетания оптимизации технологического процесса, использования ограждений и правильно спроектированных систем вентиляции [10].

На промышленных объектах термин «сварочный аэрозоль» часто используется как собирательное обозначение видимых аэрозольных частиц, выделяющихся в процессе сварки и смежных операций [11]. Это понятие выходит далеко за пределы облака оксидов металла, мгновенно поднимающегося над швом [12]. Во временном измерении оно охватывает как стадии, предшествующие сварке: шлифовка кромок, удаление заусенцев, лазерная очистка или протирка растворителем, в результате которых образуются минеральная и текстильная пыль, а также капли жидкости, так и последующие операции: выравнивание шва, полировка, зачистка и удаление остатков шлака, при которых вновь поднимается смесь металлической и абразивной пыли [13–15]. В пространственном отношении речь идёт как о наноразмерных конденсационных ядрах, быстро формирующихся у сопла горелки, так и о «состарившихся» частицах, которые, переносясь воздушными потоками цеха, оседают на фермах, площадках и оборудовании и

могут вновь подниматься в воздух [16]. Поэтому в современной гигиене труда сварочный аэрозоль рассматривается как совокупность всех твёрдых и жидких частиц размером менее 100 мкм, попадающих в воздух в течение всего цикла «сварка–отделка» под действием тепловых или механических факторов и способных недолго находиться в рабочей зоне [17]. Многообразие источников, размеров частиц и моментов их выброса определяет необходимость оценки воздействия и инженерного контроля на основе анализа всей технологической цепочки, а не только мгновенного выделения аэрозоля из расплавленной ванны [18].

1.1.2 Характеристики выделяющихся вредностей при выполнении сварочных работ

Сразу после выхода из высокотемпературной зоны дуги сварочный аэрозоль за миллисекунды проходит стадии зародышеобразования, столкновений и коагуляции. Получающиеся частицы настолько малы, что традиционное различие «дым/пыль» теряет смысл: максимум массового распределения всегда находится ниже 2,5 мкм, а максимум распределения концентрации приходится на 0,3 мкм; большинство частиц в тысячу раз меньше диаметра человеческого волоса. При фракционном отборе каскадным импактором более 80 % частиц имеют размеры в интервале 0,1–0,3 мкм, а частицы размерами более 10 мкм практически не обнаруживаются. Именно малый размер частиц делает сварочный аэрозоль похожим на газ: он длительно зависает в рабочей зоне и проникает в альвеолы, оставаясь «видимым, но неуловимым» компонентом воздуха цеха.

Частицы имеют неправильную пористую форму; для удобства исследований их размер описывают кинетическим диаметром, эквивалентным шару определённого диаметра [19]. На рисунке 1.1 приведен измеренный гранулометрический состав дыма при различных способах сварки, например, для TIG-сварки (Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом – АДС ВЭ), максимум распределения концентрации частиц приходится на 0,1 мкм, основной диапазон — 0,08–0,3 мкм; крупные частицы практически отсутствуют. При других

технологиях концентрация частиц ещё ниже.

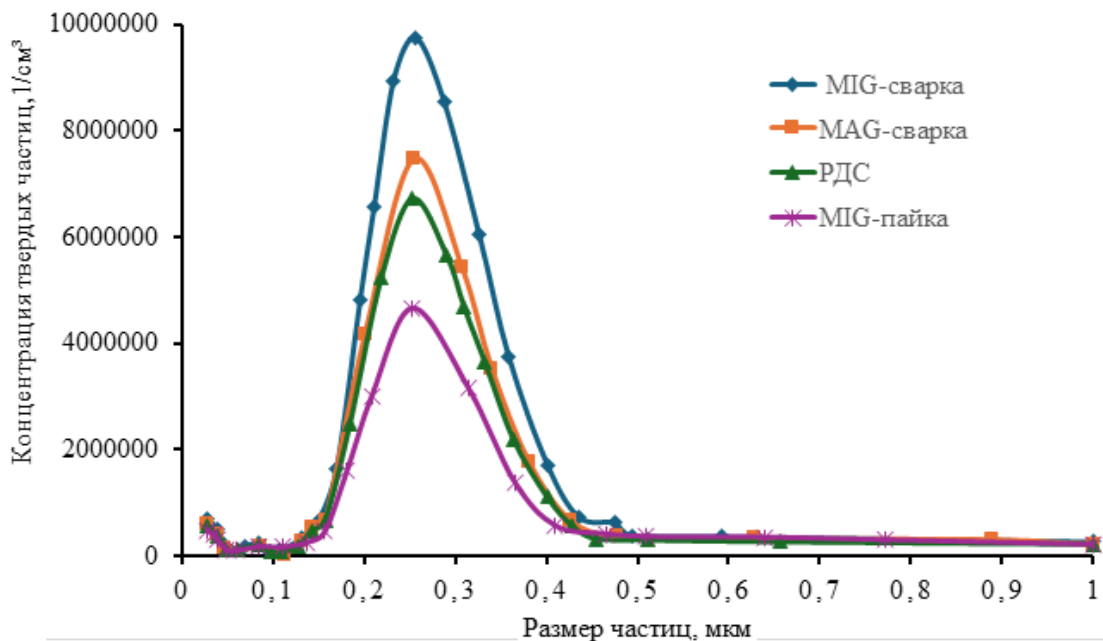


Рисунок 1.1 – Кривая распределения частиц сварочного аэрозоля по диаметру[19]

Гранулометрический состав сварочного аэрозоля показывает, что более 50 % массы приходится на фракцию размером меньше 0,3 мкм. Они длительно висят в воздухе, выносятся за пределы территории и служат прекурсорами вторичных аэрозолей, способствуя появлению смога. Проникая в дыхательные пути, такие частицы обходят механические барьеры верхних дыхательных путей; в альвеолярной зоне осаждаются на 30–50 %. Частицы размерами меньше 0,1 мкм способны преодолевать альвеолокапиллярную мембрану, попадать в системный кровоток и разноситься в сердце, печень, мозг и другие органы. Исследования на животных и профессиональных группах показали, что депонированные частицы через окислительный стресс, активацию воспалительных сигнальных каскадов и нарушение функции митохондрий вызывают повреждение альвеолярного эпителия, дисфункцию сосудистого эндотелия и миокардиальный фиброз. Большая удельная поверхность позволяет аэрозолю адсорбировать вирусы, бактерии и газообразные загрязнители, формируя комплексы из «биочастиц» и «частиц-химикатов»; это повышает время задержки патогенов в дыхательных путях и может усиливать инфекционную эффективность. С учётом данных по атмосферному переносу и

внутреннему распределению Международное агентство по изучению рака (IARC) отнесло сварочный аэрозоль к группе 1 (канцероген для человека) [19]. Риски охватывают не только дыхательную систему, но и сердечно-сосудистую и нервную системы, создавая острую и хроническую угрозу как для работающих, так и для населения окружающей территории.

Из-за доказанной опасности большинство стран ввели жёсткие нормы [20–23]. По 8-часовому средневзвешенному показателю (TWA) самым жёстким является китайский стандарт GBZ 2.1-2019 – 4 мг/м³ (общая пыль), установили единый уровень 5 мг/м³; при этом ЕС подчёркивает фракцию «inhalable», что технически отличается от «total dust», применяемой в США и РФ, однако цель регулирования сходится – свести концентрацию субмикронного металлического аэрозоля к допустимому риску.

1.1.3 Взаимодействие сварочного аэрозоля с воздушными и тепловыми потоками

Согласно литературным данным [20-24] сварочный аэрозоль формируется внезапным испарением металла в высокотемпературной зоне дуги. Образующиеся наноразмерные зародыши уносятся восходящей струей; при резком падении температуры они конденсируются, затем за счёт броуновского движения и турбулентного сдвига коагулируют и дробятся. Уже через доли секунды формируются частицы размерами 0,1–0,3 мкм. В дальнейшем на частицы действуют гравитация, тепловая плавучесть, межмолекулярные силы и броуновская диффузия, что способствует дальнейшему развитию процессов осаждения, коагуляции и диффузионного переноса. Поэтому в одной и той же точке пространства концентрация частиц разного размера изменяется по-разному.

Частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм принято обозначать как PM_{2,5}, а частицы с аэродинамическим диаметром менее 1 мкм — как PM₁. Аналогичным образом вводятся обозначения PM_{0,5} и PM₁ [25]. Указанная классификация получила широкое международное признание и будет

использоваться в дальнейшем тексте настоящей работы.

Предполагая, что все частицы сферические, и не учитывая фазовые переходы частиц, химические реакции при взаимодействии с воздушным потоком, а также взаимодействия между частицами, между частицами и контактными поверхностями, то силы, действующие на отдельные частицы в поле воздушного потока, в основном, можно представить следующим образом [26, 27, 28].

Сила тяжести F_g , действующая на частицы, определяется выражением

$$F_g = m_p g = \rho_p V_p g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g, \quad (1.1)$$

где m_p – масса частиц, кг;

ρ_p – плотность частиц, кг/м³;

V_p – объём частиц, м³;

d_p – диаметр частиц, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила плавучести F_b или сила Архимеда

$$F_b = m_g g = \rho_g V_p g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_g g, \quad (1.2)$$

где m_g – масса газа в объеме, занимаемом частицами, кг;

ρ_g – плотность газа, кг/м³.

Поскольку плотность газа намного меньше плотности частиц, сила плавучести, действующая на частицы в поле газового потока, обычно незначительна.

Когда вязкий газ обтекает твердые частицы, последние испытывают тангенциальные напряжения и давление газа. С точки зрения течения в одной плоскости с частицами эти силы можно рассматривать как синтез двух сил, а именно: подъемной силы F_l , которая перпендикулярна направлению входящего потока, и силы сопротивления потока F_d , которая действует в том же направлении, что и входящий поток. При этом F_d связана с относительной скоростью частицы и газа.

При движении одиночной сферической частицы в неподвижной вязкой газовой среде на неё действует сила аэродинамического сопротивления, которая может быть записана в виде:

$$F_d = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 |u_g - v_p| (u_g - v_p), \quad (1.3)$$

где u_g – скорость газа, м/с;

v_p – скорость движения твердых частиц, м/с;

C_D – коэффициент сопротивления сферических частиц, выраженный в виде:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} f(\text{Re}_p). \quad (1.4)$$

$f(\text{Re}_p)$ – функция, определяемая через величину критерия Рейнольдса Re_p :

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_g d_p |u_g - v_p|}{\mu}, \quad (1.5)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

В процессе ускорения частицы приводят в движение окружающий газ, которая, в результате инерции оказывает реакцию на частицы. В этот момент сила, приводящая частицу в движение, будет немного больше силы инерции самой частицы. Эта часть силы называется силой виртуальной массы (также известная как сила дополнительной массы) F_m , и ее выражение имеет вид:

$$F_m = -\frac{\pi}{12} d_p^3 \rho_g \frac{d}{dt} (v_p - u_g). \quad (1.6)$$

Для двухфазного потока в $\rho_p \gg \rho_g$ сила виртуальной массы проявляется только при большом ускорении частиц, которым обычно можно пренебречь.

Когда частицы находятся в поле потока с градиентом давления $\partial p / \partial l$, то из-за неодинакового давления на поверхность частиц, на нее будет действовать сила, противоположная градиенту давления, то есть сила градиента давления:

$$F_p = -\frac{\pi d_p^3}{6} \frac{\partial p}{\partial l}. \quad (1.7)$$

Ускоренное движение частицы в вязкой среде приводит в движение близлежащий газ, а неустойчивость поверхностного слоя ведет к тому, что на

частицы действует сила, связанная с отставанием развития этого слоя, известная как сила Бассета, которая выражается в виде [29]:

$$F_B = \frac{3}{2} d_p^2 \sqrt{\pi \rho_g \mu} \int_{t_0}^t \frac{d(v_p - u_g)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (1.8)$$

В неоднородном поле потока градиент скорости заставляет частицы вращаться, и когда число Рейнольдса мало, вращающиеся частицы заставляют поверхностную скорость среды увеличиваться (вращение в том же направлении) и уменьшаться (вращение в противоположном направлении), тогда на частицы действует сила, перпендикулярная направлению движения, т.е. сила Магнуса. Выражение для нее имеет вид [30]:

$$F_M = \frac{\pi}{8} d_p^3 \rho_g \gamma (v_p - u_g)^2, \quad (1.9)$$

где γ – коэффициент подъемной силы, 1/м.

Было показано [31], что частицы не вращаются в большинстве областей поля течения из-за ограничений по вязкости среды, и поэтому сила Магнуса имеет меньшее влияние, за исключением пристеночной области. Даже при высоких скоростях вращения частиц сила Магнуса все еще значительно меньше, чем сила сопротивления. Для частиц диаметром 100 мкм она составляет всего 1% от сопротивления воздуха (силы сопротивления) при скорости вращения 1800 об/мин [32].

При наличии градиента скорости в поле газа, где находятся частицы, даже если частицы не вращаются, под действием сдвига вязкой среды на частицы действует подъемная сила, известная как подъемная сила Саффмана, выражение для которой имеет вид [33]:

$$F_S = 1,61 d_p^2 (\rho_g \mu)^{\frac{1}{2}} (v_p - u_g) \sqrt{\left| \frac{du_g}{dy} \right|}. \quad (1.10)$$

Градиент скорости существует, в основном, в пограничном слое, и сила сдвига Саффмана больше действует на частицы, диаметр которых немного меньше толщины пограничного слоя и которые находятся в непосредственной близости от

стенки. Поскольку градиент скорости в основном потоке изменяется очень мало, этой силой обычно можно пренебречь.

Когда частица движется в неоднородном температурном поле, то молекулы окружающей среды, имеющие различные скорости, наталкиваются на частицу, при этом на нее действует сила, известная как термофоретическая сила, выраженная в виде [34]:

$$F_{th} = -3\pi\mu d_p f(\text{Kn})\nabla T, \quad (1.11)$$

$$\text{где } f(\text{Kn}) = \frac{d_p (C_{tm} \text{Kn}) \left\{ \left(\frac{k_g}{k_p} + C_t \text{Kn} \right) \left(1 + \frac{4}{3} a_3 C_m \text{Kn} \right) - \frac{4}{3} a_3 C_m \text{Kn} \right\}}{\left[(1 + 3C_m \text{Kn}) \left(1 + 2 \frac{k_g}{k_p} + 2C_t \text{Kn} \right) \right]}, \quad (1.12)$$

T – средняя температура окружающего газа, К;

k_g и k_p – теплопроводность газа и гранулированного материала соответственно, Вт/(м·К);

∇T – градиент температуры окружающего газа, К/м;

C_t – коэффициент температурного скачка;

C_m – коэффициент вязкого скольжения;

C_{tm} – коэффициент скорости теплового потока;

a_3 – квадратичная константа скольжения;

Kn – число Кнудсена.

Знак минус в формуле (1.11) означает, что направление силы противоположно градиенту температуры.

В [35, 36] показано, что при движении частиц в поле потока с определенным градиентом температуры, когда размер частиц составляет от 0,01 мкм до 10 мкм, влияние термофоретической силы не является пренебрежимо малым по сравнению с гравитацией и сопротивлением воздуха. С увеличением размера частиц степень влияния термофоретической силы на их движение значительно уменьшается, а для частиц размером более 10 мкм влияние термофоретической силы становится практически пренебрежимо малым [37].

В результате основными силами, действующими на высокотемпературные одиночные частицы в поле потока, являются сила тяжести и сопротивление воздуха (сила сопротивления); при размере частиц 0,01 – 10 мкм следует учитывать роль термофоретической силы; при расположении частиц в пристеночной области следует учитывать влияние силы Магнуса; при наличии большого градиента скорости в поле потока или большого ускорения частиц следует одновременно учитывать подъем сдвига Саффмана и роль силы Бассета. В исследованиях по удалению дымовых газов в сварочных цехах следует учитывать гравитацию, плавучесть и силу сопротивления.

1.2 Анализ исследований общеобменной и местной вентиляции в сварочных цехах

В сварочных цехах для обеспечения предельно допустимой концентрации (ПДК) частиц РМ1 в сварочном аэрозоле используется вентиляция, как общеобменная приточная и вытяжная, так и местная вытяжная [38].

Общеобменная вентиляция организует воздухообмен всего объёма цеха за счёт механических или естественных сил, снижает среднюю концентрацию загрязнений, регулирует температуру и влажность и обеспечивает приемлемое качество воздуха в рабочей зоне [39]. Расход воздуха рассчитывают либо на одного работающего, либо на ассимиляцию вредных веществ, либо по кратности обмена. Приточная вентиляция формирует значительный поток от приточных решёток к верхним или нижним вытяжным отверстиям, в процессе чего аэрозоль разбавляется, и концентрация вредных веществ снижается до уровня ПДК.

Анализ исследований [40] показывает, что в большинстве работ рассматриваются стационарные источники загрязнения с преимущественно крупными фракциями. В исследованиях практически отсутствуют данные по частицам РМ1.

В большинстве работ рассматриваются малые и средние сварочные цехи, отсутствуют исследования цехов с большим пролётом, значительной глубиной и

перепадом высот.

Изучены преимущественно системы с постоянным расходом воздуха; влияние многочисленных препятствий в цехе не учтено.

Известно, что местная система вентиляции является наиболее эффективным средством улавливания загрязнений непосредственно у источника, препятствуя распространению вредностей в рабочей зоне. В сварочном производстве применяют две конструктивные схемы местной системы вытяжной вентиляции [41]:

- рабочее место закрывают комбинированным экраном (боковым и верхним), физически изолируя сварочную дугу от цеха; при этом загрязнённый воздух перемещается к вытяжной установке.

- в корпус сварочной горелки интегрируют всасывающее сопло, микроцентрифугу и фильтр-рециркулятор; сварочный аэрозоль улавливается, очищается и сразу возвращается в зону сварки.

Обе схемы местной вентиляции обеспечивают высокую эффективность при минимальном расходе воздуха и значительно снижают общую загрязнённость цеха. Чаще всего удаляемый воздух проходит через дымо-/пылеуловитель.

В работах [42–44] отмечены следующие варианты удаления вредностей в сварочных цехах:

- малогабаритные передвижные фильтровентиляционные агрегаты с местным отсосом;
- вытяжные устройства, входящие в системы общеобменной вытяжной вентиляции;
- крупные центральные системы местной вытяжной вентиляции.

1.2.1 Обзор методов и аппаратов очистки пылевоздушных потоков

Для того чтобы уменьшить загрязнение атмосферы мелкими твердыми частицами от выбросов промышленного производства и сжигания ископаемого топлива, необходимо извлечь твердые частицы из отработанного газа для

обеспечения нормативных требований к выбросам. Устройство обеспыливания предназначено для удаления пыли в промышленном производстве. Используемые технологии удаления пыли делятся на следующие четыре категории [45]:

1. технология механического удаления пыли;
2. технология электростатического пылеулавливания;
3. технология пылеудаления через пористые слои;
4. технология мокрого пылеудаления.

Технология механического обеспыливания – это технология, которая использует действие массовых сил, таких как сила тяжести, инерционная сила и центробежная сила, для отделения частиц в запыленном газовом потоке. Существуют следующие три широко используемые устройства механического удаления пыли:

- 1) гравитационная камера;
- 2) инерционный пылеуловитель;
- 3) циклонный пылеуловитель.

Преимуществами гравитационной камеры являются простота конструкции, низкая стоимость, небольшие инвестиции, простота обслуживания, удобство управления, малые потери давления, возможность работы с высокотемпературными дымовыми газами. Однако она громоздка, может улавливать только частицы размером более 50 мкм, поэтому обычно используется в качестве устройства предварительной очистки перед высокоэффективным пылеуловителем.

Инерционный пылеуловитель – это устройство, которое изменяет направление воздушного потока путем добавления перегородок и отделяет частицы пыли от воздушного потока с помощью их инерции. Обычно он используется для очистки от минеральных или металлических частиц с большими размерами и высокой плотностью. При работе с волокнистыми и клейкими частицами такие устройства подвержены засорению. Можно отметить хороший эффект удаления крупных частиц размером более 20 мкм.

Обычно используемый циклонный пылеуловитель в зависимости от направления потока газа можно разделить на тангенциальный и аксиальный тип входа [46]. Его основными преимуществами являются простота конструкции, низкие инвестиции, средние потери давления, низкое энергопотребление, устойчивость к высоким температурам, простота обслуживания и эксплуатации, эффективность разделения. Для изготовления могут быть использованы различные материалы. Однако, в таких аппаратах может образоваться вторичная пыль из более мелких частиц, поэтому использовать их для улавливания частиц менее 5 мкм нерационально.

Принцип работы электрофильтра заключается в том, что частицы пыли в пылегазовом потоке заряжаются после прохождения через электростатическое поле высокого напряжения, а затем происходит осаждение частиц пыли из пылевоздушного потока под действием силы электрического поля. Электростатический фильтр улавливает частицы размером 0,2 мкм, эффективность удаления пыли может составлять более 99%, а потери давления невелики – от 100 до 300 Па. Однако, это оборудование дорогостоящее, имеет высокие материалоемкость и энергопотребление, значительные габариты, подвержено физическому влиянию частиц [47].

Пористый материал, используемый для отделения твердых частиц от запыленных жидкостей (газов или жидкостей), называется фильтрующим материалом. Когда запыленный газовый поток проходит через фильтрующий материал, частицы пыли прилипают к нему и отделяются от газового потока. Преимуществом способа является улавливание частиц широкого диапазона размеров, имеющих высокую температуру и концентрацию, легковоспламеняющихся и взрывоопасных частиц, мелких частиц, гигроскопичных частиц [48]. Оборудование имеет хорошую адаптивность и поэтому получает все более широкое применение.

Технология мокрого обеспыливания – это технология, использующая контактные аппараты, в которых формируются водяные капли или жидкие пленки. Контакт воды или других жидкостей с потоком запыленного газа способствует

отделению частиц пыли. Мокрые пылеуловители – это пылеуловители с водяной пленкой, циклонная пластинчатая башня и т.д. [49]. Принцип работы заключается в том, что запыленный газовый поток проходит через пространство, заполненное каплями воды или другой жидкости, или омывает жидкую пленку. В результате инерционного столкновения, эффекта перехвата, эффекта диффузии, агломерации и других действий частицы пыли из газового потока осаждаются. Недостатки данного способа заключаются, в основном, в большом потреблении энергии, необходимости системы обратного водоснабжения для очистки отработанной жидкости и шлама.

В таблице 1.1 представлены результаты сравнения различных технологий удаления пыли.

В целом, все четыре типа технологии удаления пыли имеют свои особенности с точки зрения условий применения. В большинстве случаев имеет место высокая эффективность удаления для частиц размером более 10 мкм, но для частиц размером 0,01–10 мкм эффективность удаления пыли очень низкая. При этом, несмотря на малые размер частиц и массовую концентрацию, их количественная концентрация очень высока [50].

В настоящее время большинство технологий пылеудаления используются при разработке пылеуловителей в разных странах. По принципу действия пылеуловители делятся на две категории: сухие механические пылеуловители и мокрые пылеуловители. В различных странах существует два основных типа методов усиления контроля над мелкодисперсными частицами: первый заключается в усовершенствовании существующего пылеуловителя, но процесс модернизации является более дорогостоящим и может создать новые проблемы, такие как увеличение ограничений в применении [51]; второй заключается в том, что мелкодисперсные частицы образуют агломераты при устройстве предварительной обработки так, что размер частиц увеличивается до такой степени, что могут использоваться пылеуловители для сбора твердых частиц размерами более 10 мкм [52].

Таблица 1.1 Сравнение основных технологий удаления пыли

Технология	Механизм пылеудаления	Преимущество	Недостатки	Эффективность
Механическое пылеудаление	Использование механической силы, создаваемой центробежной силой, гравитацией, силой инерции и другими эффектами в потоке воздуха, содержащего пыль, для достижения эффекта разделения воздуха и пыли	Подходит для рабочих мест с высокой концентрацией пыли и большим размером частиц, устойчив к высоким температурам и коррозии.	Трудность удаления частиц меньшего размера	50% ~80%
Пористые фильтры	Адсорбция, диффузионная фильтрация частиц пыли из пылевоздушного потока	Простота в эксплуатации, высокая эффективность пылеудаления	Высокая стоимость и большой перепад давления	70% ~90%
Мокрый способ	Использование воды или жидкости с ингибиторами и другими компонентами посредством инерционного столкновения, перехвата, броуновского движения и т.д., использование образования жидкой пленки, капель жидкости на частицах пыли для эффективного улавливания.	Низкая стоимость, простая конструкция; очистка от токсичных и вредных газов	Сточные воды разъедают оборудование и затрудняют очистку гидрофобной пыли.	75% ~95%
Электростатическое пылеулавливание	Высоковольтное электростатическое воздействие на запыленный газ. Запыленный газ ионизируется, частицы пыли с электрическим зарядом адсорбируются на электродной пластине.	Высокая эффективность пылеудаления, легкость удаления газов при высоких температурах и повышенной коррозионной активности	Сложная структура, только определенная пыль может быть удалена	75% ~95%

Таким образом, становится актуальным исследование способа увеличения размера мелких частиц путем агломерации при добавлении устройства предварительной обработки мелких частиц перед обычно используемым пылеуловителем и их последующего улавливания. Процесс агломерации может происходить различными способами, например, путем электрической, тепловой и акустической агломерации, при изменении фазового состояния пара, химической агломерации, воздействии света и т.д.

Технология электроагломерации заключается в воздействии электростатической силы, в результате чего мелкие частицы сближаются и образуют более крупные частицы. Сочетание технологий электрической агломерации с электрофильтром позволяет повысить эффективность пылеулавливания [53]. Использование переменного электрического поля в гетерополярно заряженном пылевом агломераторе является одним из наиболее перспективных направлений. Основные факторы, влияющие на эффективность электроагломерации, – это концентрация и размер частиц, напряженность внешнего электрического поля и распределение заряда [54, 55].

Луо Г. и др. [56] провели фрактальное исследование процесса электроагломерации, проанализировав движение и закон агломерации субмикронных частиц в электрическом поле и применив теорию фрактального роста для создания математической модели фрактального роста процесса электроагломерации. Результаты показывают, что фрактальная размерность связана с гранулометрическим составом частиц. Чем больше фрактальная размерность, тем более неупорядоченной является структура агломерата, тем сильнее способность к пространственному росту, тем легче агломерировать субмикронные частицы и тем выше эффективность удаления пыли. В работах [57, 58] показаны результаты экспериментальных исследований по улавливанию респирабельных частиц с помощью электрической агломерации. Результаты эксперимента показали, что эффект агломерации частиц в диапазоне размеров 0,5–10 мкм оптимальный, что намного лучше, чем у частиц других размеров при тех же рабочих условиях.

В итоге можно сделать вывод, что, во-первых, размер взвешенных частиц влияет на эффект электрической агломерации, но конкретные правила и механизмы недостаточно изучены. Во-вторых, распределение заряда является важным фактором, влияющим на эффект электрической агломерации, а компоненты пылевоздушного потока будут влиять на распределение заряда, поэтому важно изучить влияние этих компонентов на эффект электрической агломерации.

Технология акустической агломерации – это технология, использующая акустическое поле высокой плотности энергии для увеличения вероятности взаимного столкновения частиц и повышения эффективности агломерации. Принцип заключается в использовании акустического поля высокой интенсивности для обработки запыленного воздушного потока, ускорения взаимного движения частиц, увеличения вероятности столкновения, содействия агломерации частиц друг с другом и образования агломератов с более крупными размерами частиц [59], а затем применения широко используемого пылеуловителя для удаления.

Исследование акустической агломерации летучей золы угля путем проведения экспериментов и теоретических расчетов модели, показало, что для частиц размером 2,5 мкм вероятность столкновения выше, чем для более крупных частиц [60]. В работе [61] в процессе акустической агломерации добавили частицы размером 88 мкм для изучения явления двухрежимной агломерации, и результаты показали, что эффект агломерации был улучшен при добавлении частиц большого размера. Авторы [62] экспериментально исследовали характеристики агломерации летучей золы от сжигания угля в среднем акустическом поле. Результаты показали, что эффект агломерации частиц с размером частиц между 1,1–4,7 мкм хуже, чем у частиц других размерных групп.

Принцип агломерации с изменением фазы пара заключается в попадании мелких частиц в пересыщенную паровую фазу, что увеличивает размер частиц и вероятность инерционных столкновений, а также повышает эффективность улавливания в широко используемых пылеуловителях [63]. Физико-химические свойства поверхности мелкодисперсных частиц определяют эффективность их зарождения и эффект роста агломерации.

В работе [64] провели испытания на агломерацию при парофазном переходе и теоретические исследования субмикронных частиц, и экспериментальные результаты показали, что скорость роста мелких частиц больше, чем крупных, и теоретически объяснили причины. Авторы [65] экспериментально исследовали процесс удаления мелких твердых частиц при сжигании угля с помощью

технологии изменения фазы пара. Результаты эксперимента показали, что добавление паровой фазы может улучшить эффективность удаления мелких твердых частиц из пылеуловителя; добавление подходящего смачивающего агента также может способствовать агломерации мелких твердых частиц.

В [66] использовали технологию агломерации с изменением паровой фазы для предварительной агломерации PM_{2,5}, а затем удалили агломерированные частицы с помощью обычных методов удаления пыли. Исследование показывает, что сочетание технологии агломерации с изменением фазы пара и обычных технологий удаления пыли может эффективно удалять PM_{2,5}, а увеличение количества пара может улучшить эффект агломерации с изменением фазы. Авторы работы [67] добавили смачивающий агент в систему конденсационного укрупнения частиц за счёт фазового перехода водяного пара и использовали электрический низконапорный импактор (Electrical Low Pressure Impactor, ELPI) для онлайн-измерения распределения мелкодисперсных частиц по размерам и их численной концентрации. Результаты экспериментов показали, что добавление подходящего смачивающего агента значительно повышает эффективность улавливания мелких частиц. Фан Фэнсянь и др. [68] исследовали закономерности изменения распределения частиц PM_{2,5} при различных условиях конденсационного укрупнения. Полученные результаты показали, что при фазовом переходе водяного пара происходит укрупнение частиц, что способствует их последующему улавливанию. Экспериментальные результаты показали, что размер частиц остается неизменным после конденсации с изменением фазы.

Недостатком технологии агломерации с изменением фазы пара является необходимость преобразования воды из жидкости в газ, этот процесс потребляет больше энергии, что в определенной степени ограничивает промышленное продвижение технологии агломерации с изменением фазы пара. Установлено, что ультразвуковой распылитель может производить капли микронного размера, т.е. размер частиц на несколько порядков меньше обычных капель, скорость испарения в воздухе быстрее достигает состояния насыщенной паровой фазы, занимает меньше времени, способствуя цели энергосбережения.

Использование ультразвукового туманообразования для технологии улавливания мелких частиц уменьшает вторичное загрязнение [69].

Исследование и разработка оборудования для удаления пыли существуют уже более ста лет, в последние годы ученые из разных стран на основе сухой и мокрой технологии удаления пыли выдвигают новые предложения и идеи для промышленных и горнодобывающих предприятий для непрерывного развития оборудования для удаления пыли.

Сухое обеспыливание – это обеспыливание путем изменения механической силы на другую силу. Сравнение сухих механических пылеуловителей показано в приложении Д.

Мокрый пылеуловитель использует воду или жидкость с эффектом подавления пыли в качестве среды для блокировки частиц пыли в запыленном газе, а затем отделяет частицы пыли, используя столкновение, диффузию, адгезию, коагуляцию и другие связанные эффекты. В России и других странах разработаны многочисленные разнообразные конструкции мокрых пылеуловителей. Ниже приводится краткое описание некоторых мокрых пылеуловителей, принцип действия которых предполагается использовать в данной работе. В приложении Е показано сравнение описанных мокрых пылеуловителей.

Пылеуловитель гравитационного типа также известен как распылительная или скрубберная башня, принцип работы показан на рисунке 1.2 [70]. Из-за разной плотности пылегазового потока и жидкости существование гравитационного поля обеспечивает разделение газа и жидкости. Капли и частицы пыли сталкиваются, коалесценция приводит к образованию более крупных частиц. Крупные частицы пыли под действием силы тяжести оседают и выгружаются из нижней части башни, очищенный газ через туманоулавливающую башню избавляется от мелкого водяного тумана, выгружаемого из верхней части башни.

Вертикальный циклон с водяной пленкой показан на рисунке 1.3 [71]. Запылённый воздух через входной патрубок поступает в корпус. Под воздействием вновь поступающего воздуха и цилиндрической формы корпуса воздух закручивается, поднимаясь по спирали вверх. Частицы пыли под действием

центробежных сил отбрасываются к стенкам циклона. Одновременно через водораспределительное кольцо и резиновую трубку к соплам, расположенным так же тангенциально к корпусу циклона, подаётся вода. Под воздействием центробежных сил воздушного потока и силы тяжести вода растекается по внутренней стенке корпуса, образуя на её поверхности водяную плёнку. Попадая в эту водяную плёнку, частицы пыли смачиваются и в виде шлама стекают к шламоотводящему конусу, через отверстие в котором отводятся из циклона. Очищенный от пыли воздух отводится из корпуса через улитку, расположенную вверху после корпуса.



Рисунок 1.2 – Пылеуловитель гравитационного типа

Принцип работы пылеуловителя с водяной ванной показан на рисунке 1.4 [72]. Запыленный поток воздуха через сопло поступает в корпус и с высокой скоростью воздействует на поверхность воды. После соударения изменяется направление воздушного потока, при этом частицы из-за инерции продолжают двигаться в первоначальном направлении. В результате контакта при столкновении большая часть пылевых частиц и водяных капель оседают в воде. Образующиеся

водяной туман и пена обеспечивают дополнительное улавливание более мелких частиц, повышая эффективность очистки.

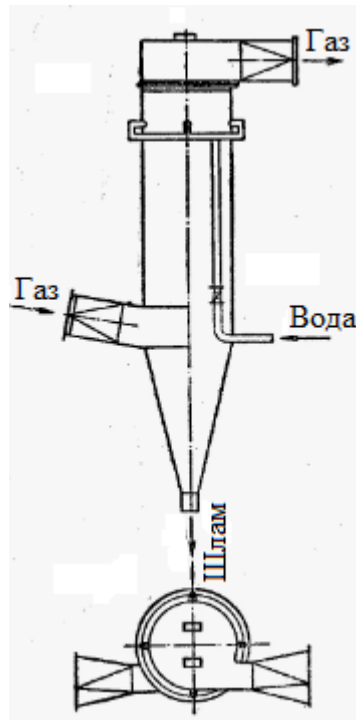


Рисунок 1.3 – Вертикальный циклон с водяной пленкой

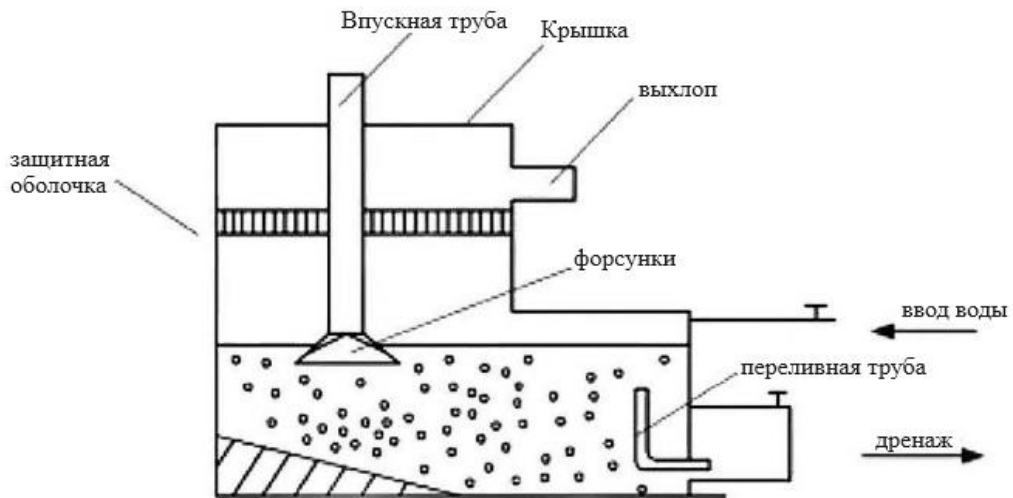


Рисунок 1.4 – Пылеуловитель с водяной ванной

Принципиальная схема импульсного пылеуловителя показана на рисунке 1.5 [72]. В нем используется импульсная сила высокоскоростного газового потока, движущегося по S-образной траектории в узком канале, для усиления функций

смачивания, коагуляции и осаждения частиц под действием водяной промывки. Пылесодержащий газ поступает в пылесборник со стороны входа, газовый поток поворачивается, ударяясь о поверхность воды, и некоторые крупные частицы пыли падают в воду. Когда запыленный газ проходит через S-образный канал между верхней и нижней лопастями, он поднимает большое количество водяных капель, в результате чего вода и газ полностью контактируют друг с другом. Большинство мелких частиц пыли смешиваются с водой, так что запыленный газ может быть очищен через S-образный канал. Очищенный газ выходит из блока пылеудаления после удаления капель воды за счет сепарации тумана, а суспензия выводится с помощью клапана выгрузки из воронки.

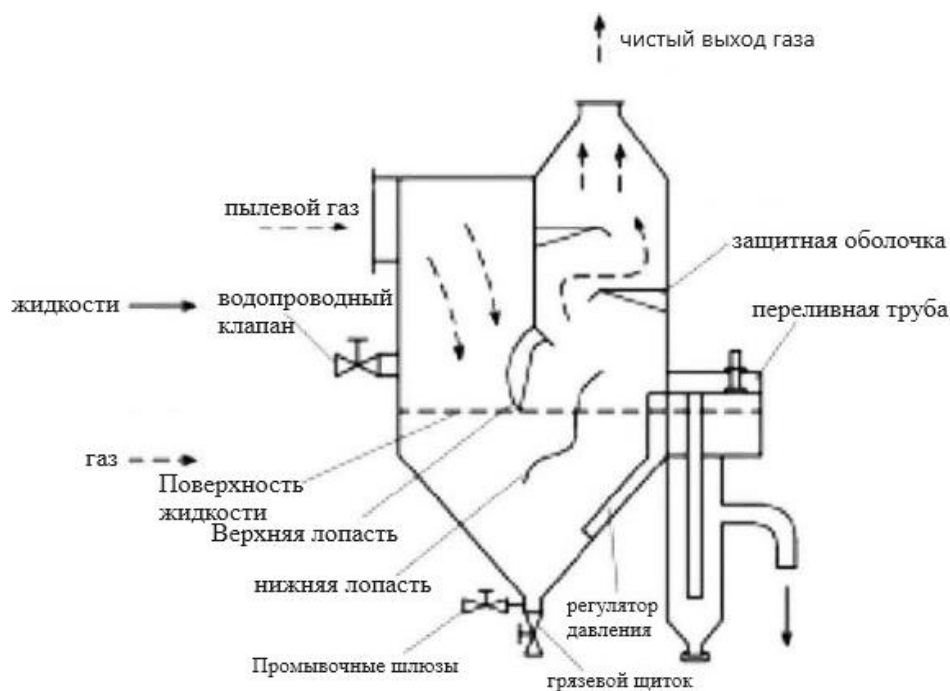


Рисунок 1.5 – Импульсный пылеуловитель

Принцип работы пылеуловителя Вентури показан на рисунке 1.6 [73]. Запыленный газ поступает в конфузур, где его скорость возрастает; перед горловиной подаётся вода, которая в зоне высокой турбулентности дробится на мелкие капли. Капли интенсивно перемешиваются с газовым потоком, смачивают частицы пыли и способствуют их коагуляции. В диффузоре скорость потока снижается, укрупнённые частицы и капли отделяются под действием силы тяжести

и центробежной силы в циклоне-каплеуловителе, а очищенный газ выводится из аппарата.

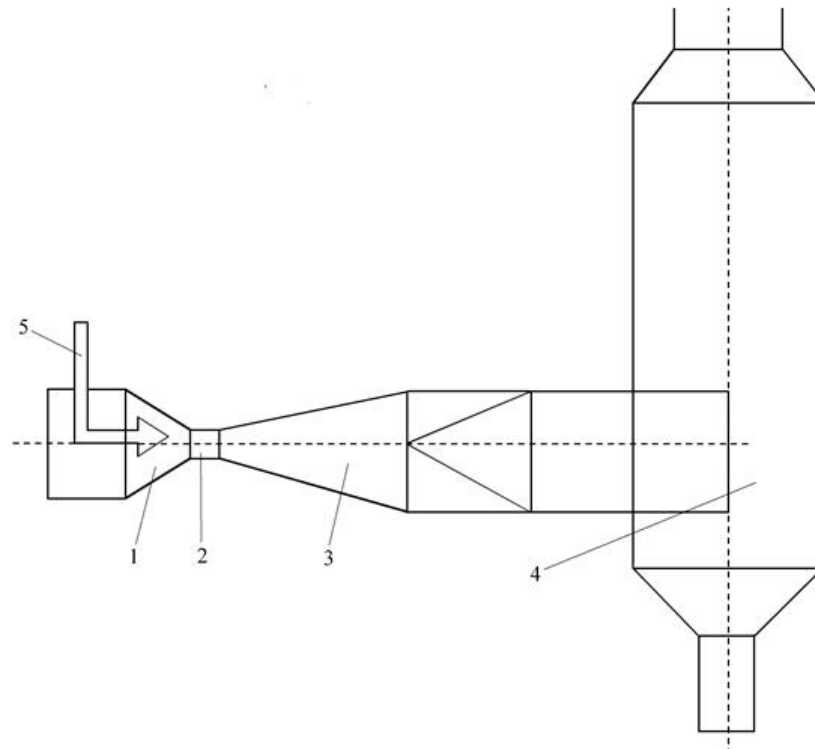


Рисунок 1.6 – Пылеуловитель Вентури

1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – циклон-каплеуловитель; 5 – подвод воды

Запыленный поток воздуха взаимодействует с вибрационным струнным экраном с водяной пленкой. В результате пыль прилипает к водяной пленке, а дополнительное вибрационное воздействие увеличивает эффект улавливания пыли. Под действием веса пыли происходит разрыв водяной пленки, пленка постоянно смывается вместе с осажденными частицами пыли, при этом образуется новая пленка воды. Очищенный воздушный поток выбрасывается в атмосферу после очистки пароводяным сепаратором. Пылесодержащая водяная пленка, смытая с поверхности, и шлам, отделенный пароводяным сепаратором, выгружаются через клапан для выпуска шлама.

В 1860-х гг. зарубежные исследователи в области решения проблем пыли одновременно начали разрабатывать конструкции мокрых пылеуловителей [74]. В конце 1960-х годов зарубежные страны разработали мокрый пылеуловитель [75], принцип работы которого заключается в том, что запыленные газы проходят через

металлическую сетку, а форсунка распыляет водяной туман на металлическую сетку, тем самым увеличивая капли жидкости и эффективность осаждения пыли. В 1970-х годах польские ученые [76] разработали мокрый циклонный пылеуловитель с включением в схему осевого вентилятора для повышения эффективности удаления пыли при небольшой площади контакта. В США изобрели [77] мокрый сеточный пылеуловитель, затем мокрый роторный пылеуловитель, способствующий осаждению частиц пыли при вращении металлической сетки. Это уменьшило засорение металлической сетки, но из-за сложной конструкции, такой пылеуловитель не производился в больших масштабах.

При изучении механизма пылеудаления значительное влияние турбулентной диффузии на эффективность сбора пыли подтверждено при исследовании мокрого пылеуловителя Йоргом Крамесом [78] и другими в 1991 году.

В 2005 г. Гвон и др. [79] создали новую математическую модель столкновения капель через взаимодействие между каплями и частицами пыли. Построив кривую изменения эффективности сбора пыли и размера частиц от механизма пылеудаления, пришли к выводу, что инерционное столкновение оказывает очевидное влияние на осаждение частиц большого размера, броуновская диффузия оказывает очевидное влияние на осаждение частиц малого размера, а перехват линейно коррелирует с размером частиц. В 2017 г. авторы [80] разработали вихревой пылеуловитель, установив форсунки в конструкции пылеуловителя Вентури, что усиливает разнонаправленное движение частиц пыли и распыленной воды, происходит активная коагуляция частиц пыли, усиливается сепарация и повышается эффективность пылеулавливания.

Несмотря на значительные результаты в области очистки вентиляционного воздуха от пыли, во многих случаях причинами недостаточной эффективности вентиляционных устройств является то, что не удается осуществить в полной мере отсос вредных выделений непосредственно из зоны дыхания или в местах их образования. В значительной части вредные выделения распространяются по помещению, загрязняя весь окружающий воздух, а общеобменная вентиляция не

только связана с большими затратами, но также не в состоянии обеспечить требуемую чистоту воздуха непосредственно на рабочих местах сварщиков.

1.2.2 Анализ способов подачи воздуха в сварочных цехах

Согласно нормативным требованиям, приточный воздух в сварочных цехах должен подаваться непосредственно в рабочую зону либо формировать воздушные потоки, эффективно воздействующие на область образования сварочного аэрозоля [81, 82]. Наиболее распространённые схемы воздухораспределения основаны на использовании горизонтальных и вертикальных струй воздуха [83, 84].

При подаче воздуха горизонтальными параллельными потоками (рисунок 1.7) обеспечивается перенос загрязнений в сторону вытяжных устройств. Для вовлечения восходящего факела сварочного аэрозоля скорость потока должна составлять не менее 0,1 м/с [84].

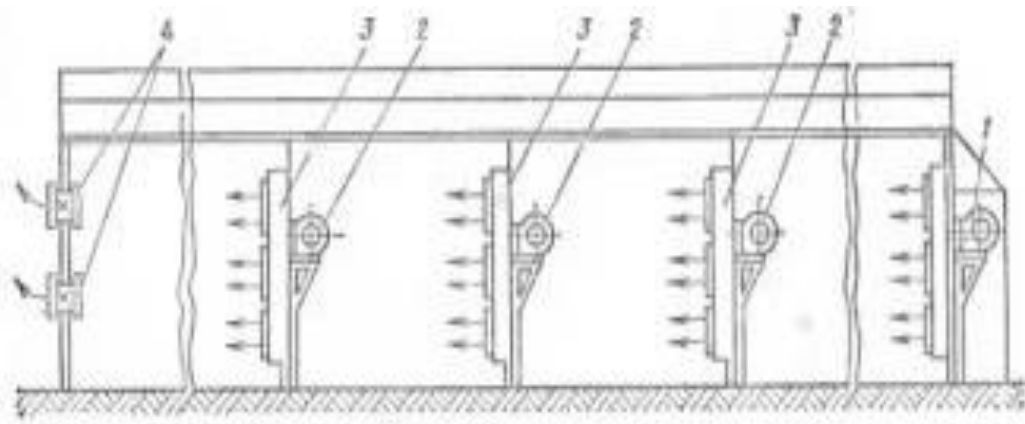


Рисунок 1.7 – Схема подачи приточного воздуха параллельными горизонтальными потоками в цехе большой длины (более 100 м):

1 – основная система подачи приточного воздуха; 2 – дополнительные вентиляторы; 3 – раздаточные решетки; 4 – вытяжные вентиляторы [84]

При подаче воздуха вертикальными потоками снизу вверх (рисунок 1.8) направление движения воздуха совпадает с естественным движением нагретых аэрозолей, что способствует их удалению из рабочей зоны и считается наиболее благоприятным вариантом организации воздухообмена [84].

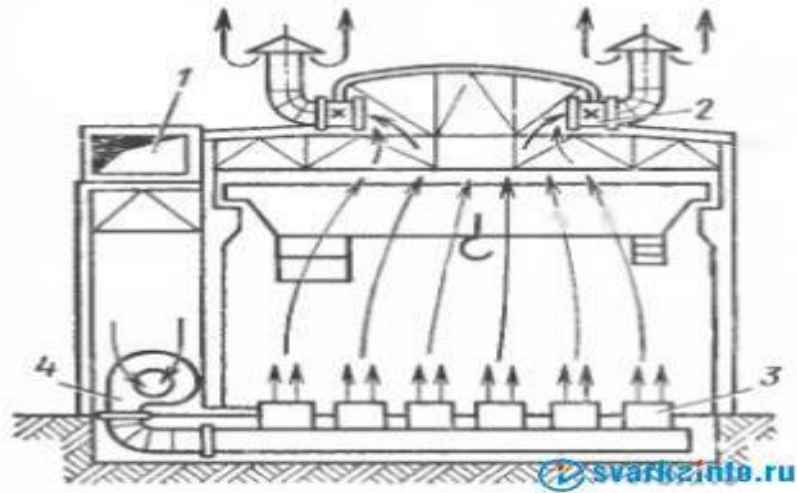


Рисунок 1.8 – Система подачи приточного воздуха по схеме параллельных потоков, направленных снизу вверх

1 – воздухозаборный короб; 2 – вытяжная установка; 3 – приточная вентиляционная установка; 4 – воздухораспределительный короб с приточными решетками в полу [84]

Схема подачи воздуха в область максимальной концентрации загрязнений (рисунок 1.9) предусматривает размещение воздухораспределителей на высоте 4–6 м. Скорость приточного воздуха принимается не менее 8 м/с, расстояние между приточными и вытяжными устройствами составляет 15–20 м, а производительность вытяжной системы должна превышать расчётный воздухообмен примерно на 10 % [84].

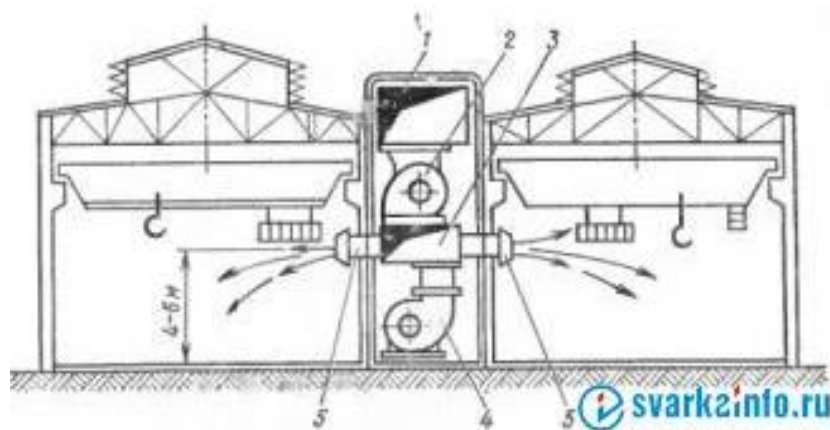


Рисунок 1.9 – Схема подачи приточного воздуха в зону максимальной концентрации вредных веществ

1 – воздухозаборный короб; 2 – система забора приточного воздуха; 3 – нагнетательный воздуховод; 4 – система подачи приточного воздуха; 5 – воздухораспределительные патрубки [84]

В отличие от рассмотренных схем, подача воздуха вертикальными струями сверху вниз менее эффективна, поскольку нарушает естественное движение нагретого загрязнённого воздуха и может способствовать его возвращению в рабочую зону [84].

В последние годы распространены системы общеобменной вентиляции Push-Pull и Diluter (рисунки 1.10–1.13) [85, 86]. Push-Pull создаёт направленный поток в верхней зоне цеха (4–6 м), перемещающий загрязнения к фильтрационным установкам; возможны П-образная и параллельная конфигурации, снижающие среднюю концентрацию сварочного аэрозоля [86].

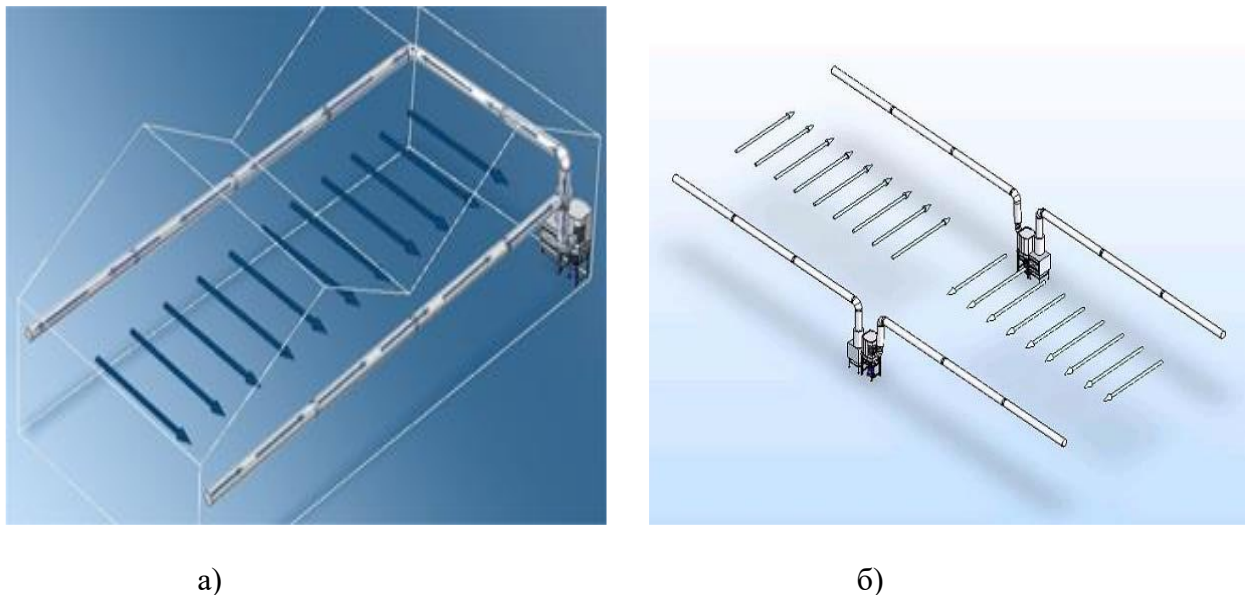


Рисунок 1.10 – Схемы систем общеобменной вентиляции Push-Pull

а – П-образная система; б – параллельная система. Стрелками показано направление движения воздуха [86]

Diluter использует регулируемые струи очищенного воздуха скоростью 0,4–3,0 м/с для направления сварочного факела к фильтровентиляционной установке. Вариантом реализации является EDS производительностью до 9000 м³/ч без развитой сети воздуховодов [86].

Следует отметить, что системы Push-Pull и Diluter обеспечивают снижение общей концентрации загрязнений в помещении, однако удаление аэрозоля

происходит уже после его распространения в объёме цеха. Кроме того, данные системы требуют применения фильтров и их регулярного обслуживания [86].



Рисунок 1.11 – Элемент системы Push-Pull в цехе при отсутствии местной вентиляции



Рисунок 1.12 – Схемы систем общеобменной вентиляции Diluter. Стрелками показано направление движения воздуха

Таким образом, анализ существующих способов подачи воздуха показывает, что наиболее эффективными являются схемы, согласованные с естественным движением сварочного аэрозоля. Вместе с тем для крупногабаритных сварочных

цехов остаётся актуальной задача формирования устойчивых воздушных потоков, обеспечивающих локализацию загрязнений непосредственно в рабочей зоне.



Рисунок 1.13 – Система Diluter в корпусе сборочного цеха

1.2.3 Конструкции местных отсосов в сварочных цехах

Местная вытяжная вентиляция является основным средством ограничения распространения сварочного аэрозоля в рабочей зоне. Эффективность её работы определяется максимальным приближением воздухоприёмника к источнику выделения загрязнений, соответствием формы отсоса характеру воздушных потоков и минимизацией влияния внешних возмущений [87, 88]. По сравнению с общеобменной вентиляцией местные отсосы позволяют удалять загрязнения непосредственно в месте их образования при существенно меньших расходах воздуха.

Существующие конструкции местных отсосов, применяемые в сварочных цехах, можно разделить на четыре основные группы [89–91].

К первой группе относятся устройства, встроенные непосредственно в сварочные горелки (рисунок 1.14). Воздухоприёмник располагается в непосредственной близости от сварочной дуги и подключается к индивидуальной или централизованной высоковакуумной системе. Для эффективной работы требуется разрежение порядка 18–20 кПа [89]. Основным достоинством таких

систем является удаление аэрозоля непосредственно в зоне его образования без необходимости дополнительного позиционирования вытяжного устройства. Вместе с тем увеличение массы горелки и повышенный расход защитного газа ограничивают область их применения.

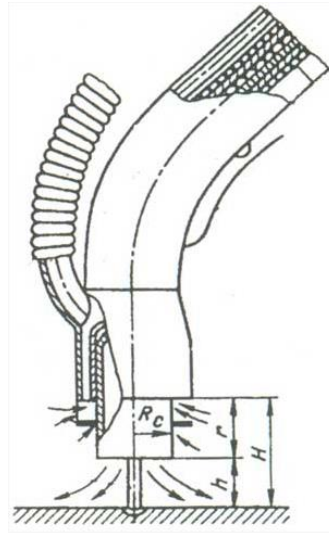


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема горелки для механизированной газосварки в углекислом газе со встроенным отсосом [89]

Вторая группа представлена стационарными вытяжными устройствами, встроенными в сварочные столы и рабочие посты (рисунки 1.15–1.17) [90]. Наибольшее распространение получили наклонные вытяжные панели и боковые вытяжные устройства. Для обеспечения устойчивого улавливания загрязнений скорость воздуха в рабочем сечении панелей принимается равной 3,4 м/с, а при сварке особо токсичных материалов может достигать 8 м/с. Удельный расход удаляемого воздуха составляет около $3300 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ площади панели [90].

Преимуществами данных конструкций являются простота изготовления и высокая надёжность. Однако эффективное удаление аэрозоля обеспечивается только при расположении зоны сварки в непосредственной близости от воздухоприёмного отверстия.

Сварочные столы с верхним отсосом (рисунок 1.17) широко применяются при обработке мелких и средних деталей. Типовая производительность

встроенного вентилятора составляет около 1600 м³/ч, а радиус эффективного обслуживания не превышает 2 м [90].

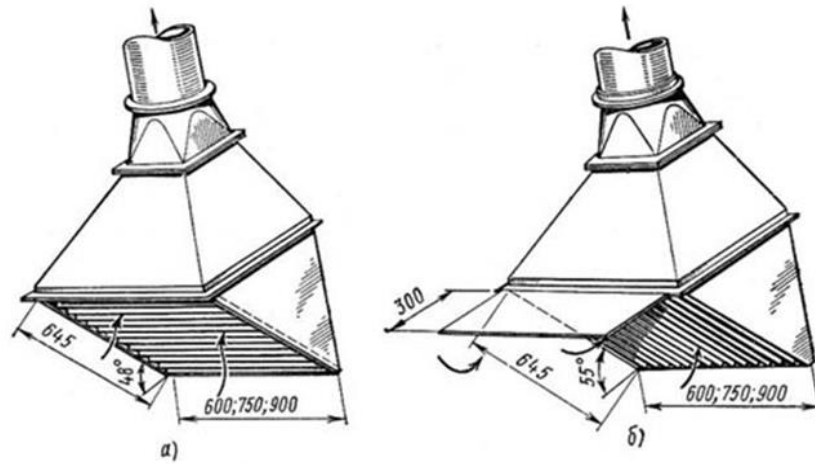


Рисунок 1.15 – Наклонные вытяжные панели

а – вытяжная панель А.С. Чернобережского; б – типовая вытяжная панель [90]

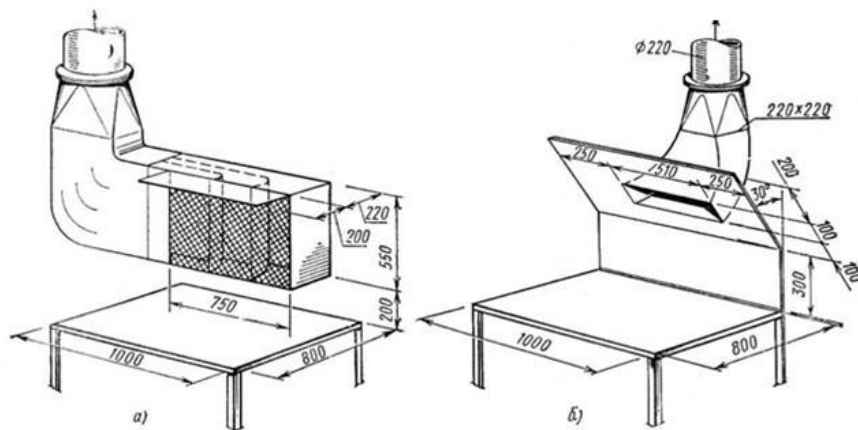


Рисунок 1.16 – Боковые вытяжные устройства для фиксированных мест электросварки:

а – конструкции Т.С. Карачарова; б – конструкции П.П. Щедова [90]



Рисунок 1.17 – Сварочный стол, оборудованный системой верхнего отсоса продуктов горения

К третьей группе относятся системы, интегрированные в сборочно-сварочные кондукторы, кантователи и позиционеры. Такие решения используются преимущественно в механизированном производстве крупногабаритных изделий и позволяют размещать воздухоприёмники непосредственно вблизи зоны сварки [90].

Четвёртая группа включает переносные и подъёмно-поворотные вытяжные устройства (рисунки 1.18–1.21). К ним относятся установки типов «Лань», «Спрут» и различные шарнирно-консольные конструкции [89–92]. Переносное устройство «Лань-160» обеспечивает расход воздуха около 1000 м³/ч и может комплектоваться воздуховодами длиной до 100 м [90].



Рисунок 1.18 – Переносные устройства Лань 160



Рисунок 1.19 – Передвижной фильтровентиляционный агрегат ФВА-1200

Передвижной фильтровентиляционный агрегат ФВА-1200 (рисунок 1.19) сочетает функции локального отсоса и очистки воздуха. В его состав входят предфильтр, ионизационная секция и осадительная кассета. Установка эффективно

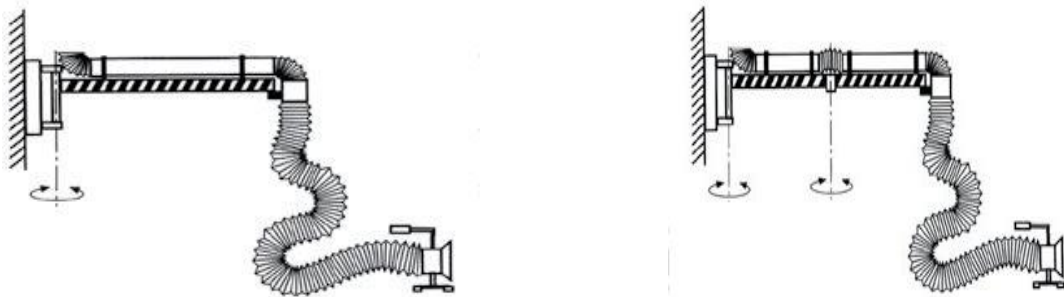
улавливает частицы размером более 0,3 мкм и имеет радиус обслуживания 2–4 м [90].



а)

б)

Рисунок 1.20 – Подъемно-поворотные вытяжные устройства
а – «Лиана»; б – «Лиана с консолью»



а)

б)

Рисунок 1.21 – Устройство «Спрут»

а – на одиночной консольной балке; б – на двойной консольной балке

Подъемно-поворотные вытяжные устройства (рисунок 1.20) позволяют располагать воздухоприёмник максимально близко к источнику выделения загрязнений. Эффективность улавливания сварочного аэрозоля достигает 80–85 % [91]. Использование консольных и телескопических механизмов обеспечивает обслуживание рабочей зоны радиусом до 8 м от точки крепления устройства [91].

Для устойчивой работы подобных систем минимальный диаметр зоны эффективного улавливания обычно принимается равным 400 мм, что соответствует длине сварного шва, выполняемого одним электродом. Минимальная высота размещения воздухоприёмника над изделием также составляет около 400 мм [92].

Устройства «Спрут» и «Лань» широко используются при сварке в замкнутых объёмах и труднодоступных местах. Их основным недостатком является

необходимость размещения воздухоприёмной воронки на расстоянии 25–50 см от зоны сварки и её периодического перемещения в процессе работы [91].

Дополнительным средством защиты сварщиков являются системы индивидуальной подачи очищенного воздуха (рисунок 1.22) [93]. В таких устройствах очищенный воздух подаётся непосредственно в сварочную маску. Типовая скорость подачи воздуха составляет около 9 м³/ч, благодаря чему внутри шлема создаётся избыточное давление, препятствующее проникновению загрязнений [93]. Основным недостатком подобных систем остаётся высокая стоимость оборудования.



Рисунок 1.22 – Сварочные маски с принудительной подачей воздуха [93]

Для очистки воздуха, удаляемого местными отсосами, применяются электростатические осадители, тканевые фильтры и мокрые скрубберы [94]. Электрофильтры обеспечивают степень очистки субмикронных частиц на уровне 90–99 % при низком аэродинамическом сопротивлении [95–101]. Тканевые фильтры характеризуются высокой эффективностью улавливания мелкодисперсных аэрозолей и являются наиболее распространённым решением в современных фильтровентиляционных установках [102–114]. Вентури-скрубберы отличаются компактностью и простотой конструкции, однако сопровождаются повышенным гидравлическим сопротивлением (5–25 кПа), значительным энергопотреблением и необходимостью удаления образующегося шлама [19].

Проведённый анализ показывает, что существующие местные отсосы способны обеспечивать высокую эффективность удаления сварочного аэрозоля только при расположении воздухоприёмника в непосредственной близости от источника загрязнений. В условиях крупногабаритных сварочных цехов

обеспечить такие условия удаётся не всегда, что приводит к распространению загрязнений в рабочей зоне и определяет необходимость дальнейшего совершенствования систем вентиляции и очистки воздуха.

1.3 Методы исследования

В вышеприведенном анализе представлены результаты с использованием различных методов исследований.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач по совершенствованию систем вентиляции и пылеудаления сварочных цехов требуется комплексный подход. Применение исключительно одного метода не позволяет получить полную и достоверную картину сложных аэродинамических и дисперсных процессов. Целесообразность использования комбинации трех методов (натурного, численного и лабораторного) обосновывается следующим образом:

1. Натурные исследования. Целесообразность натурных измерений заключается в необходимости получения объективных первичных данных о дисперсном составе и концентрации сварочного аэрозоля непосредственно в реальных производственных условиях. Поскольку характеристики выделения сварочного аэрозоля существенно зависят от конкретных режимов сварки, типа электродов и микроклимата цеха, то натурные данные являются единственным надежным базисом. Эти результаты не только отражают реальную картину загрязнения, но и служат необходимыми граничными и начальными условиями для последующего адекватного численного моделирования, обеспечивая верификацию математических моделей [115–119].

2. Численное моделирование (CFD-моделирование). Использование методов вычислительной гидродинамики (CFD) является наиболее рациональным и экономически оправданным подходом для изучения масштабных процессов в объемах целого сварочного цеха [120-124].

Во-первых, численное моделирование позволяет детально исследовать

траектории движения сварочного аэрозоля при различных схемах общеобменной вентиляции, что физически невозможно или крайне затратно реализовать на действующем предприятии.

Во-вторых, на этапе проектирования устройств местной вытяжной вентиляции (мокрый пылеуловитель), CFD-моделирование многофазных потоков (газ-жидкость) позволяет виртуально протестировать различные геометрические конструкции (четыре варианта) и визуализировать скрытые процессы гидродинамики внутри аппарата, выбрав рациональную конструкцию до создания физического прототипа. Это существенно сокращает время и стоимость разработки.

3. Лабораторные исследования (физический эксперимент) Лабораторные (полупромышленные) испытания необходимы для физического подтверждения результатов численного моделирования и оценки фактической эффективности разработанного устройства местной очистки (пылеуловителя с водяной ванной и системой орошения). Математические модели, описывающие коагуляцию и смачиваемость частиц неправильной формы в воде, имеют определенные допущения. Поэтому именно физический эксперимент в контролируемых условиях, приближенных к реальным, позволяет достоверно определить итоговый коэффициент очистки воздуха от сварочных аэрозолей и подтвердить работоспособность предложенного технического решения.

Таким образом, натурные измерения обеспечивают модель достоверными исходными данными, численное моделирование позволяет оптимизировать макро- (цех) и микропроцессы (аппарат) без излишних затрат, а лабораторные эксперименты верифицируют эффективность разработанных инженерных решений. Синтез этих методов гарантирует научную новизну, высокую точность и практическую значимость результатов диссертационного исследования.

Таким образом алгоритм диссертационного исследования можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 1.23.



Рисунок 1.23 – Схема алгоритма исследований

1.4 Выводы

1. На основании анализа санитарно-гигиенического состояния сварочных цехов определена актуальность исследований в области обеспечения нормируемых параметров микроклимата.
2. Поставлена задача проведения натурального эксперимента для нахождения дисперсного состава сварочных аэрозолей.
3. Обзор технических решений устройства систем вентиляции в сварочных цехах позволил определить направления исследований по совершенствованию воздушного режима сварочных цехов.
4. Обоснована необходимость исследований устройств для удаления твердых мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм (PM10).
5. Анализ исследований воздушораспределения в сварочных цехах позволил выявить целесообразность разработки конструкции воздушораспределителя для обеспечения нормативных требований к воздуху рабочей зоны.
6. Предложено использовать натурные, лабораторные и численные методы исследований.

2 Исследование эффективности систем общеобменной вентиляции в сварочном цехе

2.1 Исследование физических характеристик сварочного аэрозоля

2.1.1 Натурные исследования характеристик сварочного аэрозоля

Для обеспечения достоверной оценки дисперсного состава сварочного аэрозоля в производственном помещении и получения базовых данных, необходимых для последующей оптимизации систем общеобменной и местной вентиляции, проведены натурные экспериментальные исследования, направленные на установление гранулометрических характеристик частиц. Определение количественного распределения частиц сварочного аэрозоля по фракциям позволяет обосновать диапазон размеров, подлежащих приоритетному улавливанию, что создаёт научно-методическую основу для выбора пылеочистного оборудования и оценки его эффективности. Помимо этого, выявление закономерностей пространственно-временной эволюции гранулометрического состава способствует углублённому пониманию процессов миграции, диффузии и осаждения аэрозолей в условиях сварочного цеха, что, в свою очередь, обеспечивает теоретическую базу для рационального размещения воздухо-распределительных устройств, совершенствования организации воздухообмена и разработки комбинированных систем управления промышленными выбросами.

Эксперимент проводился в сварочном цехе учебно-производственного центра металлообработки Хэнаньского университета городского строительства. Площадь цеха составляет 200 м². Общий вид цеха представлен на рисунках 2.1 а, б, а процесс сварки в ходе эксперимента – на рисунке 2.1 в. Для проведения измерений использовался оптический аэрозольный спектрометр немецкого производства «The Ultimate New Model 11-R» (фирма Grimm), позволяющий с высокой точностью определять числовую концентрацию частиц в диапазоне размеров от 0,25 мкм до 32 мкм.



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Место проведения натуральных исследований характеристик сварочного аэрозоля
а – общий вид сварочного цеха; б – вид сварочного поста; в – процесс сварки

При экспериментальном измерении концентрации твердых частиц в помещении сварочного цеха точка отбора проб располагалась на расстоянии 2 м от сварочного поста и на высоте 1,5 м (зона дыхания персонала). Полученные значения концентрации мало зависят от текущего сварочного процесса и в

определённой степени отражают гранулометрический состав взвешенных частиц в рабочей зоне. Результаты показали, что пик концентрации приходится на частицы диаметром 0,3 мкм, а подавляющее большинство зарегистрированных частиц имеет размер менее 0,5 мкм (рисунок 2.2) [125].



Рисунок 2.2 – Распределение концентрации твердых частиц сварочного аэрозоля по размерам

Результаты измерений концентрации твердых частиц сварочного аэрозоля в зоне дыхания сварщика показаны на рисунке 2.3. Общее количество твердых частиц по сравнению с общим количеством твердых частиц во внешней атмосфере в 21 раз выше, в то время как количество твердых частиц с размером частиц менее 0,5 мкм составляло 75,57% от общего количества твердых частиц, частиц с размером менее 1 мкм – 97,03%, частиц с размером более 2,5 мкм – 2,812 % [126]. Количество частиц размером более 10 мкм составило 0,00084959 % от общего количества. Общая масса частиц размером менее 1 мкм составила 1800,8 мкг/м³, менее 2,5 мкм – 3549,2 мкг/м³, менее 10 мкм – 4672,3 мкг/м³. Даже концентрация PM10 в данной точке измерения превышала предельно допустимую концентрацию (ПДК) сварочного дыма, составляющую 4 мг/м³. [127].

Различия с другими данными объясняются тем, что измерения проводились

зимой, когда превышение ПДК в цехе особенно выражено, а также тем, что точка отбора находилась на некотором удалении от непосредственного места сварки.

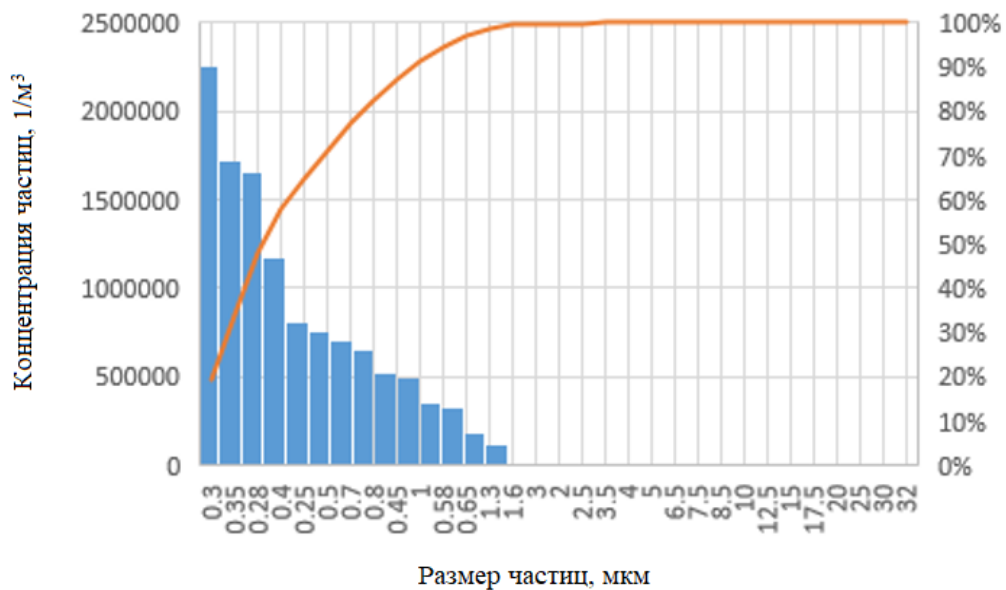


Рисунок 2.3 – Распределение концентрации твердых частиц сварочного аэрозоля по их размерам

Проанализированы характеристики распределения частиц по размерам сварочного аэрозоля согласно функции распределения Розина-Рамллера в вероятностной статистике, которая имеет вид [128]

$$f(d) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^n\right), \quad (2.1)$$

где d – диаметр частицы;

d_{50} – медианный диаметр, т.е. диаметр частиц, соответствующий случаю, когда кумулятивная функция распределения $f(x) = 0,5$, мкм;

n – параметр распределения, указывающий на разброс размеров частиц.

Медианный диаметр сварочного аэрозоля, d_{50} составил 0,328 мкм, а параметр распределения n составил 0,963, а результаты показаны на рисунке 2.4.

Для получения данных о снижении концентрации частиц различных размеров в сварочном цехе после завершения сварочных работ были проведены эксперименты по осаждению частиц. Путём непрерывного мониторинга временных изменений концентрации частиц различных фракций в течение 300 минут после окончания сварки представляется возможным количественно

охарактеризовать закономерности естественного осаждения и диффузии аэрозолей в помещении, а также установить характеристики задержания частиц различных размеров в воздушной среде цеха и скорость их удаления. Данный эксперимент позволяет выявить, какие фракции аэрозоля, образующегося в процессе сварки, обладают наибольшей способностью к длительному нахождению во взвешенном состоянии в зоне дыхания, создавая тем самым устойчивый риск для здоровья работающих.

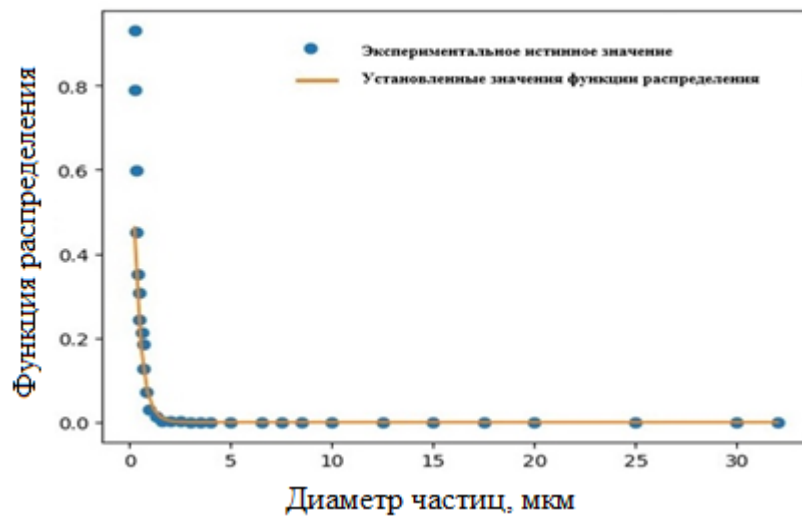


Рисунок 2.4 – Распределение Розина-Раммлера характеристик гранулометрического состава сварочного аэрозоля

На рисунке 2.5 показано изменение концентраций частиц после прекращения сварки в течение 200 мин для частиц разных размеров. Видно, что частицы размерами 2,5 мкм, 5 мкм и 10 мкм в естественных условиях быстро оседают: их концентрация снижается более чем на 80 %. Для частиц размерами 1 мкм и 0,5 мкм падение менее выражено: концентрация уменьшается примерно на 50 %. Наименьшая «выветриваемость» у фракции размером 0,25 мкм: спад составляет лишь около 20 %.

Кривые затухания показывают: чем крупнее частицы, тем быстрее они оседают естественным путём; мелкие же остаются взвешенными [129]. Для частиц размерами меньше 1 мкм гравитация уже не доминирует: частицы подчиняются броуновскому движению, постоянно совершают случайные скачки и могут годами

висеть в воздухе, образуя устойчивый аэрозольный коллоид [130]. Такой коллоид обладает высокой сдвиговой стабильностью: при встрече со стенкой или волокном фильтра вероятность прилипания резко падает, а механизмы перехвата (инерция, просеивание, перехват) становятся неэффективными [131].

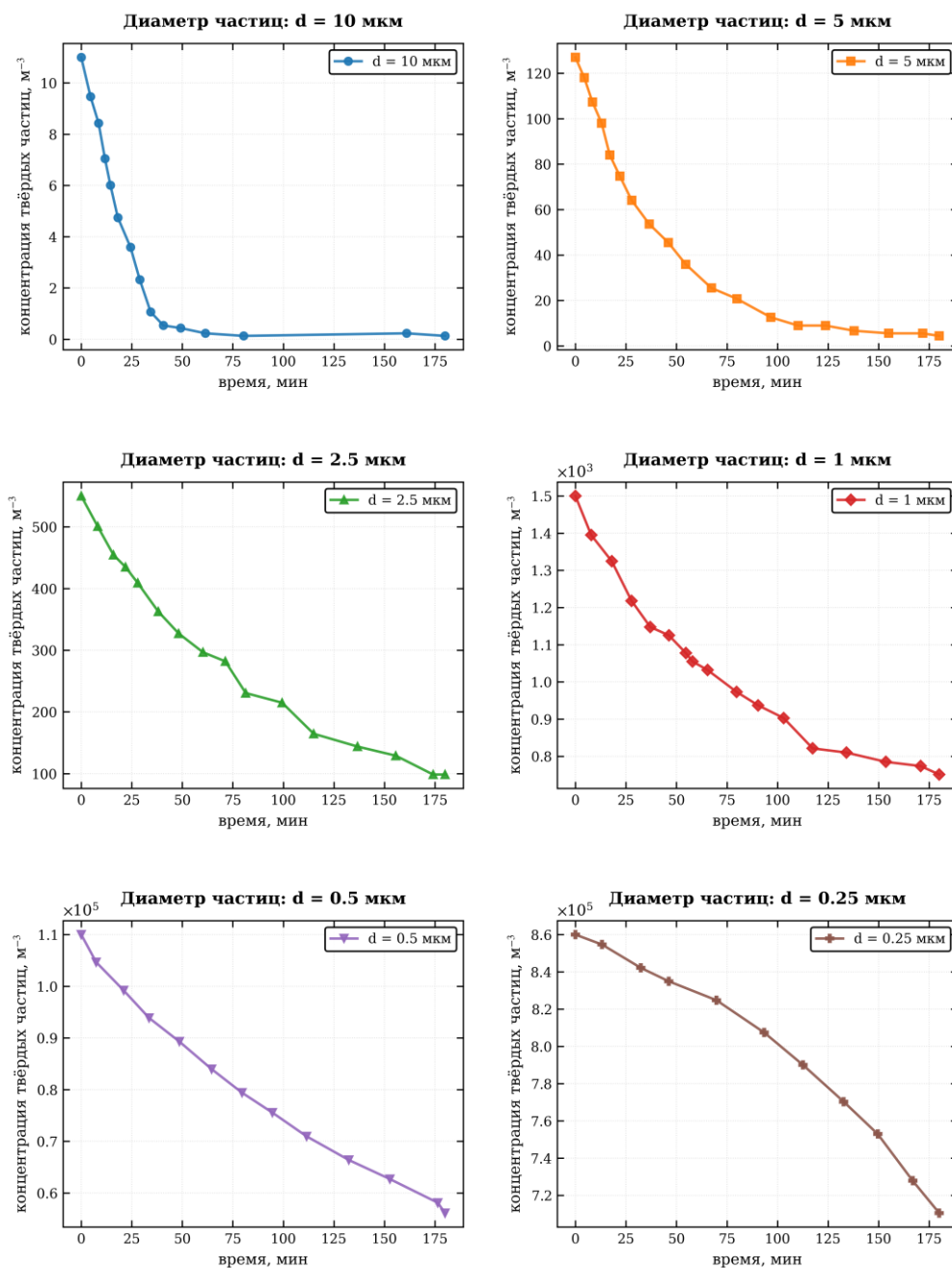


Рисунок 2.5 – Зависимость концентрации твердых частиц от времени после прекращения сварки

Сверхвысокая концентрация вызывает частые столкновения между частицами и мгновенное образование рыхлых фрактальных агрегатов. Их

плотность мала, форма неправильная; под действием турбулентного сдвига агрегаты тут же распадаются, возвращая в поток первичные ультрадисперсные ядра и поддерживая постоянную «активность взвеси». Благодаря высокой поверхностной энергии частицы быстро адсорбируют летучие органические соединения, ещё больше повышая стабильность аэрозоля. Именно поэтому фракция размерами меньше 1 мкм наименее поддается физическому удалению и одновременно проникает глубже всех в лёгочную ткань, представляя максимальную опасность для здоровья. Её очистке и должно быть посвящено главное внимание в исследованиях по борьбе со сварочным аэрозолем.

2.1.2 Анализ физических факторов, влияющих на распространение сварочного аэрозоля

Для разработки конструктивных решений вентиляционных систем сварочного цеха больших размеров выбран крупный сварочный цех судостроительного предприятия. Длина, ширина и высота этого цеха составляют соответственно 216 м, 66 м и 13,7 м (рисунок 2.6) [132]. Для предотвращения распространения сварочного аэрозоля в атмосферу при входе и выходе из цеха установлены воздушные завесы [133]. Внутри цеха по всему пространству распределены 80 рабочих мест для проведения сварочных работ. Положения сварщиков не являются фиксированными, они меняются в зависимости от требований технологического процесса.

На высоте 4,5 м в цехе размещены кран-балки, из-за чего вертикальные воздуховоды приточных систем вентиляции проложены вдоль колонн цеха для подачи свежего воздуха непосредственно в рабочую зону. Каждый из шести независимых воздуховодов имеет четыре воздухораспределителя. Два из них в средней части являются четырехсторонними и два односторонних. Высота выпуска воздуха от 0,500 м до 1,500 м (рисунок 2.7) [132]. Однако наличие конструктивных колонн и многочисленного оборудования в цехе препятствует движению воздуха, что отрицательно сказывается на эффективности вентиляции. Учитывая

модульную конфигурацию цеха вдоль продольной оси, для снижения вычислительных ресурсов при проведении численных экспериментов принято решение о разделении цеха на 5 модулей с периодическими границами, как показано на рисунке 2.8 [134].

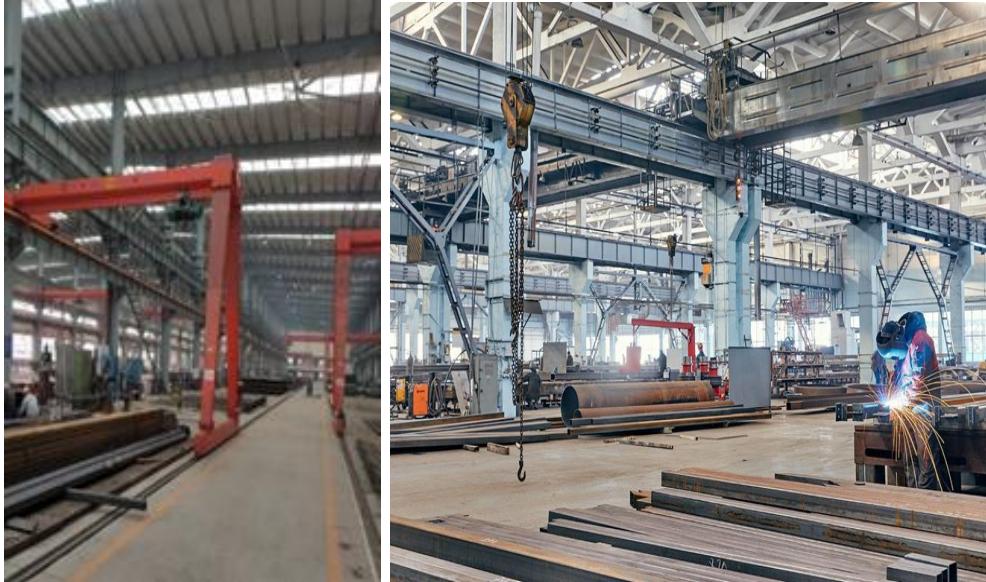


Рисунок 2.6 – Сварочный цех

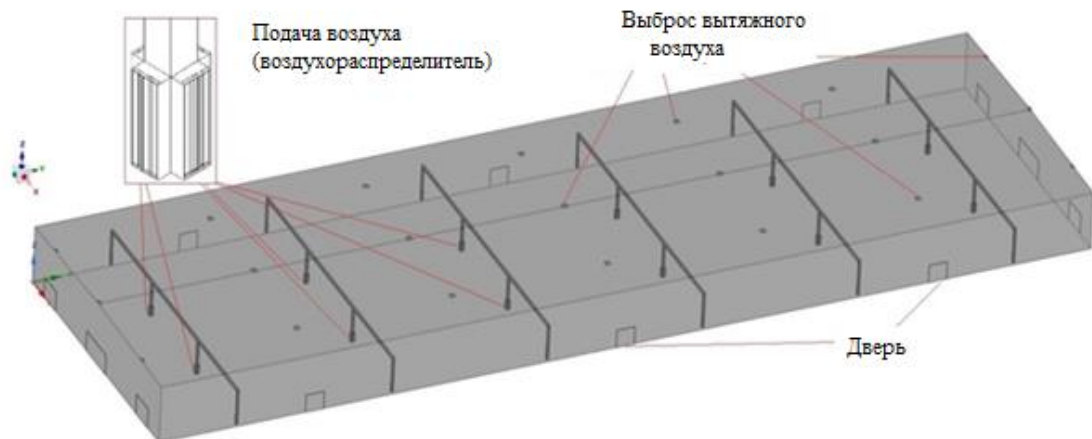


Рисунок 2.7 – Системы общеобменной вентиляции сварочного цеха

Системы вытесняющей вентиляции не подходят к применению в помещениях с большим количеством внутренних конструкций и значительными препятствиями [22]. Следовательно, в данном цехе могут использоваться только смешанные системы вентиляции. Исходя из конструктивных особенностей здания,

разработаны две конфигурации системы: подача сверху и вытяжка снизу, а также подача снизу и вытяжка сверху. Их соответствующие конструкции показаны на рисунке 2.9 [134].

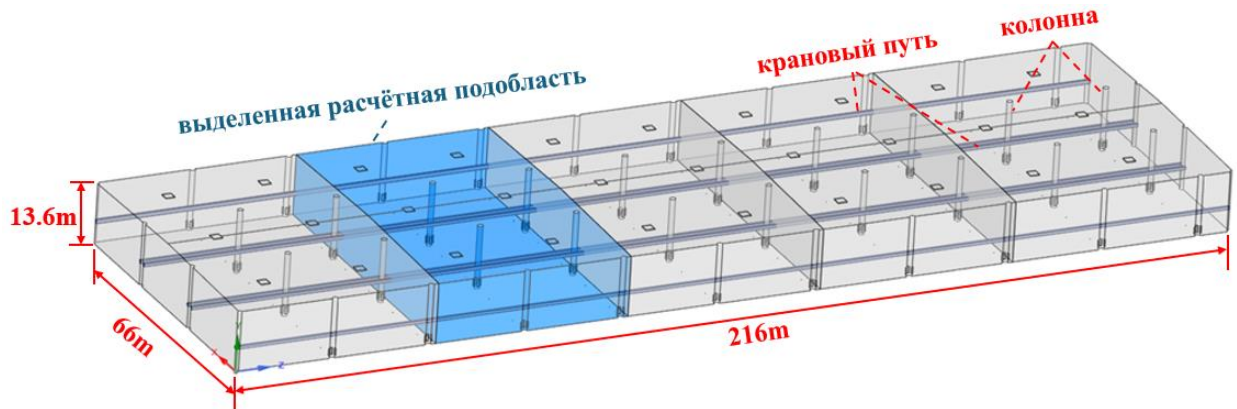


Рисунок 2.8 – Моделирование системы общеобменной вентиляции сварочного цеха

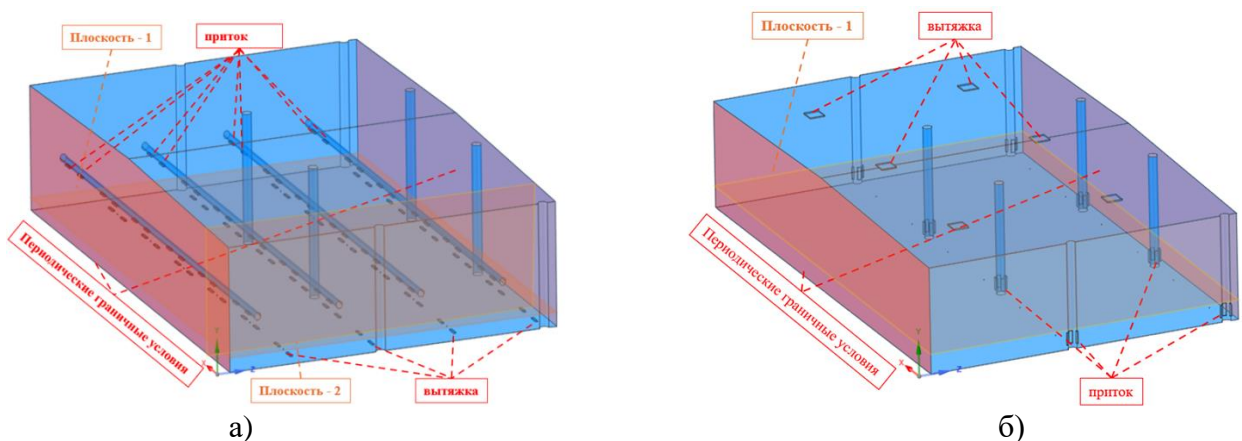


Рисунок 2.9 – Схема размещения системы вентиляции

а – подача воздуха сверху, вытяжка снизу; б – подача воздуха снизу, вытяжка сверху

Ввиду сложности внутреннего оборудования и сооружений в этом цехе, которые в основном представляют собой временные установки, необходимые для технологических нужд и часто мобильные, разработана система вентиляции, в которой направление воздушного потока может регулироваться с течением времени.

а. система вентиляции с подачей сверху и вытяжкой снизу

Исследуемая зона оснащена четырьмя приточными воздуховодами, на каждом из которых размещено по 12 воздухораспределителей размерами $2 \times 0,25$ м. Между соседними приточными воздуховодами на уровне пола (вытяжные

воздуховоды проложены под перекрытием), установлены 12 вытяжных отверстий тех же габаритов $2 \times 0,25$ м. Поскольку места сварки не фиксированы, рассматривается наиболее неблагоприятный вариант: сварочный пост располагается непосредственно под приточным отверстием, всего в модели задано 12 таких постов.

б. система вентиляции с подачей снизу и вытяжкой сверху

Исследуемая зона оснащена двумя приточными воздуховодами; приточные воздухораспределители крепятся к колоннам цеха. Поперечный ряд включает четыре колонны: на крайних устанавливаются по два воздухораспределителя, на средних – по четыре. Всего размещено 24 приточных воздухораспределителя размером $1,5 \times 0,5$ м. В кровле сварочного цеха предусмотрены шесть вытяжных люков 2×2 м.

В этом исследовании разработано три варианта вентиляционной системы: подача снизу – вытяжка сверху (вариант 1), подача сверху – вытяжка снизу (вариант 2) и подача сверху – вытяжка снизу с воздухораспределителями с вращающимися решётками (вариант 3). В варианте 1 воздуховоды подачи размещены на высоте 4,800 м, что выше уровня передвижения кранов (4,500 м); в варианте 2 и 3 воздуховоды закреплены на колоннах цеха, а положение приточных отверстий показано на рисунке 2.9.

Выбраны две контрольные плоскости (рисунок 2.9):

- горизонтальная (плоскость 1) – на высоте 1,500 м, соответствующей рабочей зоне, что позволяет анализировать распределение полей скорости и концентрации частиц в рабочей зоне.
- вертикальная (плоскость 2) – проходящая через приточные и вытяжные отверстия, а также сварочные посты, на расстоянии 4,5 м от стены цеха. По вертикальной плоскости анализируются поля скорости и концентрации частиц внутри помещения.

Моделирование работы вентиляционной системы проводилось с помощью программы вычислительной гидродинамики. Ввиду низкой скорости подаваемого воздуха для решения уравнений Навье-Стокса использовалась модель ламинарного

течения. Процесс сварки моделировалась в соответствии [135], при этом точка сварки рассматривалась как входное отверстие с диаметром 0,100 м. Скорость воздушного потока составляет 0,874 м/с. Воздух поступает через коническую диффузионную насадку с углом конуса 30 градусов. Температура воздуха составляет 1100 К, сварочный дым состоит из частиц размером 0,8 мкм с плотностью 7870 кг/м³ и температурой падающих частиц 1100 К. Температура окружающей среды составляет 296 К. Удельное образование пыли для применяемого в цехе электрода марки J422 составляет 8 г/кг [136]. С учётом массы и продолжительности горения одного стержня рассчитана скорость выделения пыли: 6,44 мг/с. В настоящем исследовании массовая скорость поступления сварочного аэрозоля от одного поста принята равной 6,44 мг/с.

Во всех моделях исследования применена единая сетка: 30 мм на входных и выходных участках, 15 мм в зоне сварочного поста, в остальном объёме – 120–640 мм. Коэффициент роста ячеек 1,2; общее число элементов – 4–16 млн.

2.1.3 Численное моделирование процесса осаждения твердых частиц в воздухе

Учитывая сложность аналитических решений уравнений описывающих взаимодействие твердых частиц с воздушным потоком, для разработки технических средств улавливания взвешенных частиц и инженерных методов расчета могут быть использованы результаты численного моделирования [132]. Известно, что численные методы широко применяются в настоящее время как для оценки состояния воздушной среды помещений различного назначения [12, 39, 137–141], так и расчетов технологических процессов, например, [142], в том числе и сварочных производств [10, 41, 143].

Предположения, принятые при моделировании, в процессе построения модели были сделаны следующие:

- влияние внутреннего оборудования и конструкций цеха на вентиляцию не учитывается;

- осаждение твёрдых частиц на внутренних стенах и других поверхностях не учитывается;
- влияние летучих органических соединений (ЛОС), образующихся в процессе сварки, на движение частиц не учитывается.

Основные настройки CFD-модели, использованные в численном моделировании, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры CFD-модели

Модель турбулентности	Реализуемая модель k-ε (Realizable k-ε) с применением улучшенной пристеночной обработки (Enhanced Wall Treatment).
Модель дискретной фазы	Используется модель дискретных частиц (DPM), диаметр частиц принят равным 1 мкм.
Межфазные силы	Учитываются сила сопротивления (модель Шиллера–Наумана, Drag-Schiller-Naumann), подъёмная сила (модель Томиямы, Lift-Tomiyaama) и турбулентная диффузия (Turb-dispersion).
Скорость выделения сварочного аэрозоля	6,4444 мг/с для каждой сварочной точки.
Температура приточного воздуха:	25 °С.
Граничные условия на входе	Вход с заданным массовым расходом (Mass-flow-inlet).
Граничные условия на выходе	Выход с заданным давлением (Pressure-outlet).

2.2 Исследование эффективности общеобменной вентиляции для удаления сварочного аэрозоля

2.2.1 Разработка конструкции воздухораспределителя с вращающимися решётками

Воздухораспределитель является одним из основных элементов системы вентиляции и оказывает существенное влияние на формирование внутреннего воздушного потока и эффективность вентиляции. В промышленной вентиляции распространены аппараты с переменным направлением подачи воздуха. В целях повышения пылеудаляющей способности вентиляционной установки предложен воздухораспределитель с вращающимися решётками, конструкция которого

показана на рисунках 2.10 – 2.12. Внешний вид устройства показан на рисунке 2.10, внутренняя конструкция – на рисунке 2.11.

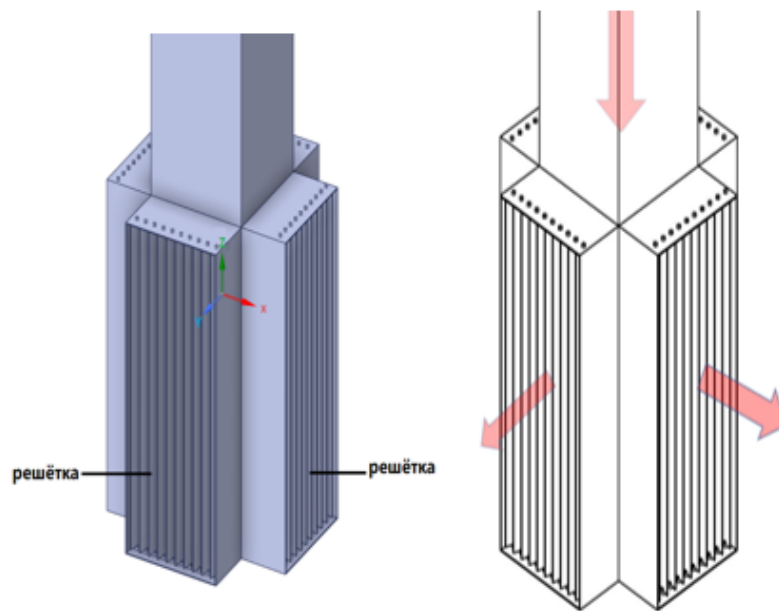


Рисунок 2.10 – Схема конструкции воздухораспределителя с четырехсторонним выпуском

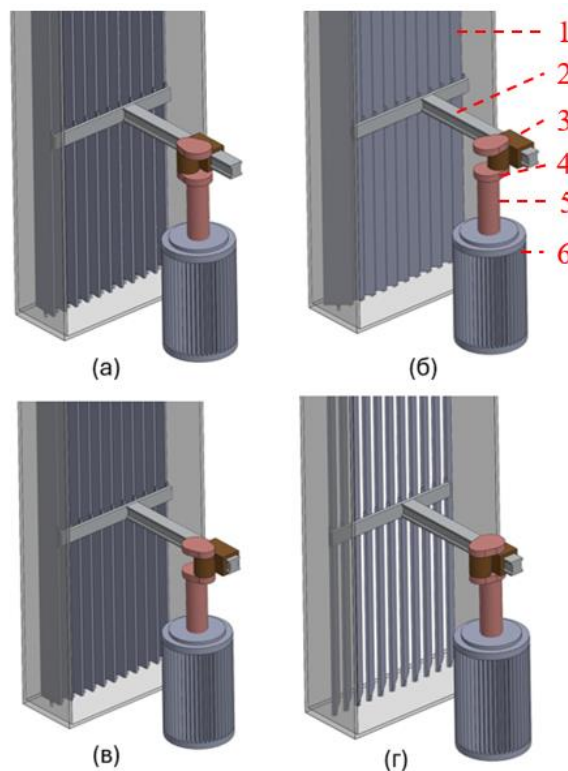


Рисунок 2.11 – Схема внутреннего устройства воздухораспределителя с четырёхсторонним выпуском:

1 – решётка; 2 – шатун; 3 – ползун; 4 – коленчатый вал; 5 – шпindel; 6 – электродвигатель

Внутри воздухораспределителя размещены электродвигатель, подшипники,

коленчатый вал, ползун и шатун. Через коленвал и ползун вращательное движение мотора преобразуется в поступательное движение шатуна, который, в свою очередь, приводит к повороту решёток воздухораспределителя. Изменяя количество коленвалов, ползунков и шатунов, можно обеспечить вращение решёток в различных направлениях. На рисунке 2.10 показан четырёх-направленный воздухораспределитель с вращающимися решётками; по тому же принципу возможно исполнение с одно- и двунаправленным вращением решёток [132].

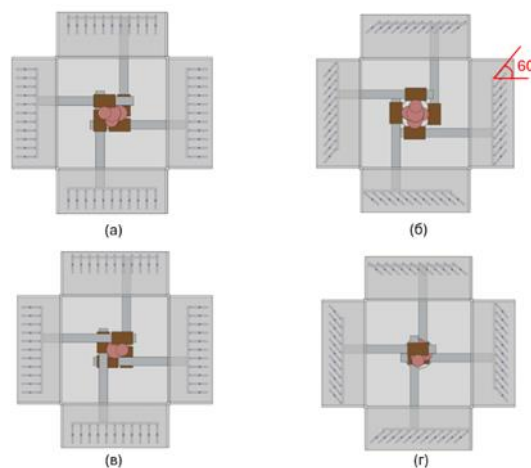


Рисунок 2.12 – Вид сверху движения воздухораспределителя с четырёхсторонним выпуском

На рисунке 2.11 показана последовательность движений всего воздухораспределителя за один период работы. На рисунке 2.12 представлен процесс движения воздухораспределителя с четырёхсторонним выпуском [134].

2.2.2 Численная модель воздухораспределителя с вращающимися решётками

Сложности данного численного исследования состоят в нестационарности распределения воздуха из воздухораспределителя, поскольку решетка вращается, в связи с чем необходимо использовать адекватное упрощение. Способ упрощения заключается в эквивалентной замене данного воздухораспределителя с решеткой на отверстие без решетки с равным расходом. Изменение направления вектора скорости, вызванное вращением сетки, может быть имитировано путем задания направления скорости в программном комплексе FLUENT, в частности, путем разложения вектора скорости на составляющие V_x вдоль направления потока и V_y

перпендикулярно направлению потока, записи соответствующих выражений и условий в программу FLUENT. Уравнения для компонентов скоростей выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} V &= V_x + V_y; \\ V_x &= V \cdot |\sin \alpha|; \\ V_y &= V \cdot |\cos \alpha|, \end{aligned} \tag{2.2}$$

где α – угол между направлением воздушного потока и плоскостью, в которой расположен выходной патрубок воздухораспределителя, диапазон изменения α составляет от 30° до 150° ; α связан с «flow-time» выражением $\alpha = \text{«flow-time»} \cdot \pi/60$ [132].

2.3 Численная модель воздушного режима сварочного цеха при использовании общеобменной вентиляции

Диффузия и осаждение сварочного аэрозоля в воздушном потоке цеха не являются пассивным «следованием» за потоком: их динамика определяется совокупностью факторов. Скорость подачи воздуха задаёт интенсивность и направление вихревого поля, формируя «базовую» картину сил, действующих на частицы. Размер частиц охватывает нанометровый и субмикронный диапазон: крупные фракции инерционно отклоняются от траектории потока, мелкие – в основном движутся вместе с ним. Агломерация образует рыхлые фрактальные структуры, понижая объёмную плотность (пористость как доля внутренних пустот) и, следовательно, конечную скорость осаждения и способность «следовать» за потоком. До настоящего времени количественных данных о степени влияния этих трёх параметров нет, поэтому существующие вентиляционные модели опираются на упрощение «идеальная сфера, плотная, монодисперсная». Настоящее исследование методом CFD анализа устанавливает диапазоны влияния скорости подачи, размера частиц и пористости на эффективность удаления аэрозоля, что служит основой для проектирования систем общеобменной вентиляции.

2.3.1 Влияние скорости на характеристики осаждения твердых частиц

Для исследования влияния скорости подачи воздуха на эффективность системы общеобменной вентиляции при удалении пыли в сварочном цехе заданы скорости подачи воздуха 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с и 20 м/с. Наблюдения проводились в течение 120 с после начала выброса твердых частиц. Результаты изменения концентрации пыли в зоне деятельности персонала и общей массы твердых частиц в цехе представлены на рисунках 2.13 и 2.14 [132].

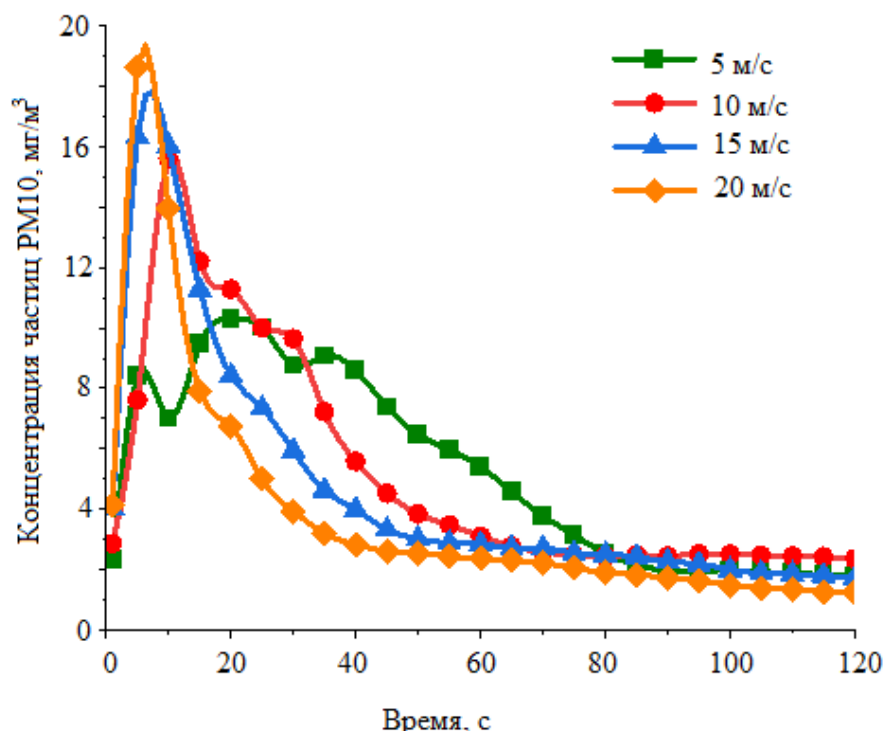


Рисунок 2.13 – Изменение концентрации частиц PM10 в зоне деятельности персонала

Результаты исследования показывают общую тенденцию уменьшения концентраций, но темп уменьшения концентрации твердых частиц в зоне деятельности персонала существенно выше, чем изменение общей массы твердых частиц в цехе. Хотя увеличение скорости воздуха может увеличить скорость снижения концентрации твердых частиц в зоне деятельности персонала, уменьшение общего количества твердых частиц в сварочном цехе все еще происходит медленно. Необходимо 120 секунд, чтобы снизить концентрацию

PM10 в рабочей зоне цеха на 45%. Для обеспечения качества воздуха в рабочей зоне скорость его подачи должна быть максимально увеличена, но слишком высокая скорость может привести к ухудшению качества сварочных работ и увеличению потребления энергии. Рекомендуется скорость приточного воздуха 10 м/с, а для улучшения условий труда в период технологических перерывов возможно организовать усиленное проветривание помещения увеличением скорости воздуха до 15 м/с. Увеличивать производительность систем вентиляции для достижения эффективного удаления пыли нецелесообразно, и ее необходимо сочетать с другими местными вытяжными системами для удаления пыли [20].

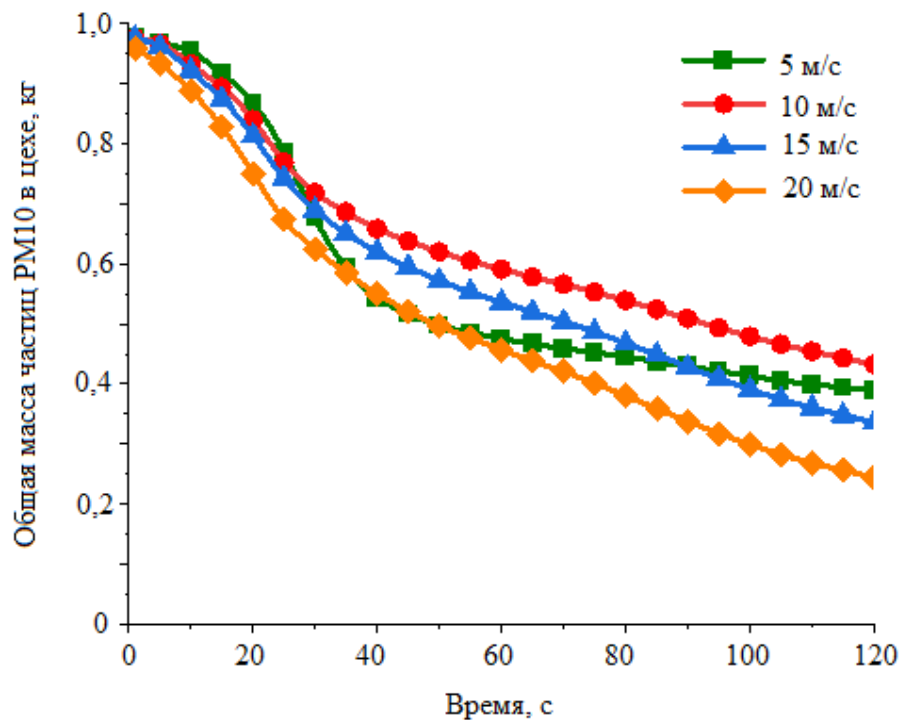


Рисунок 2.14 – Изменение общей массы частиц PM10 в цехе

2.3.2 Влияние диаметра частиц на характеристики осаждения твердых частиц

Для изучения влияния общей системы вентиляции на эффективность удаления частиц различных размеров, рассмотрен процесс удаления шести типов частиц при скорости подачи воздуха 10 м/с: PM50, PM20, PM10, PM5, PM2.5 и PM1.

Зависимости уменьшения концентрации от времени, показаны на рисунках 2.15 и 2.16 [132].

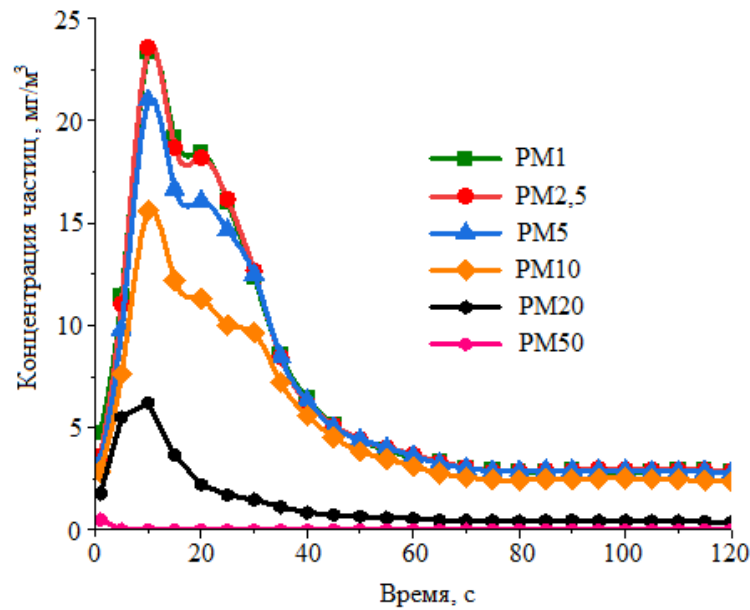


Рисунок 2.15 – Изменение концентрации PM в зоне деятельности персонала

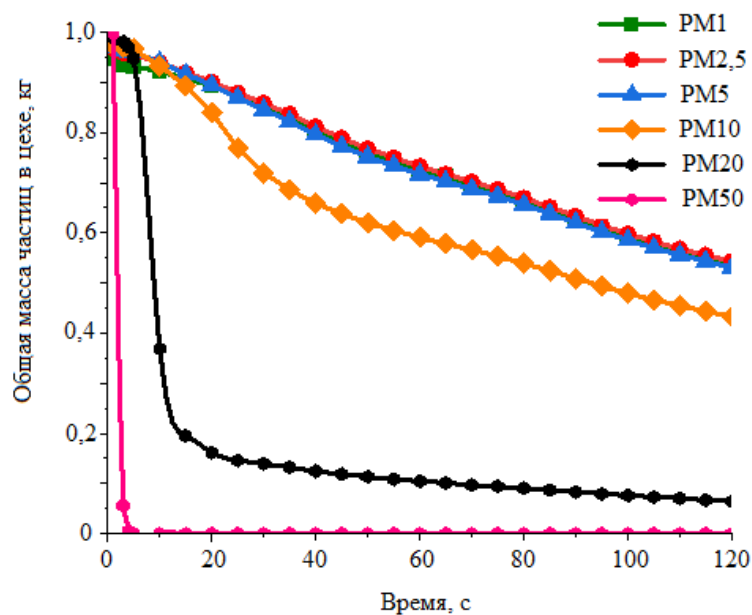


Рисунок 2.16 – Изменение общей массы PM в цехе

Согласно результатам расчета, размер частиц оказывает значительное влияние на скорость оседания частиц. Частицы с размером 50 мкм под влиянием силы тяжести, оседают на поверхностях в течение 5 с, их концентрация в воздухе рабочей зоны за это время снижается практически до 0. Частицы с размером 20 мкм

также быстро удаляются из рабочей среды, при этом их концентрация уменьшается на 80% за 15 с. Однако частицы размером менее 10 мкм (PM10, PM5, PM2,5, PM1,) слабо подвержены влиянию сил гравитации, и их трудно удалить из окружающей среды без применения электрических, магнитных или других физических полей. За 30 с удаляется 30% PM10 и 15% PM5, PM2,5, PM1. Эти частицы могут попасть в легкие через дыхательные пути и являются наиболее вредной средой для человеческого организма. Рекомендуется удалять эту фракцию через местные системы вентиляции.

2.3.3 Влияние пористости на характеристики осаждения твердых частиц

Частицы сварочного аэрозоля представляют собой сотовые пористые структуры, содержащие множество мелких пор внутри. Пористость обычно используется в качестве косвенного показателя объема, занимаемого пустотами внутри частиц. В данном исследовании рассмотрены четыре различные величины пористости частицы с размером 10 мкм; с пористостью 75%, 50%, 25% и 0%, что соответствует плотности 1/4, 1/2, 3/4 и 1 от плотности стандартных частиц Fe₃O₂. Как и в предыдущем эксперименте, частицы равномерно распылялись в рабочей зоне цеха на уровне 0,500 м от пола, приточный воздух направлен со скоростью 10 м/с. Влияние пористости на характеристики движения твердых частиц анализировалось путем наблюдения за массой общего количества твердых частиц в рабочей зоне цеха. Результаты показаны на рисунках 2.17 и 2.18 [132].

Результаты показывают, что чем меньше пористость, тем труднее удалить частицы PM10. Причина этого явления заключается в том, что чем выше пористость, тем меньше плотность частиц, чем меньше плотность, тем меньше инерция, а чем меньше инерция, тем труднее удалить частицы; но для частиц размером менее 10 микрон влияние сил инерции меньше, поэтому пористость мало влияет на эффект удаления частиц, разница между эффектом удаления частиц PM10 с пористостью 75% и 0% находится в пределах 10%, поэтому влияние пористости можно не учитывать при проектировании систем местной вентиляции.

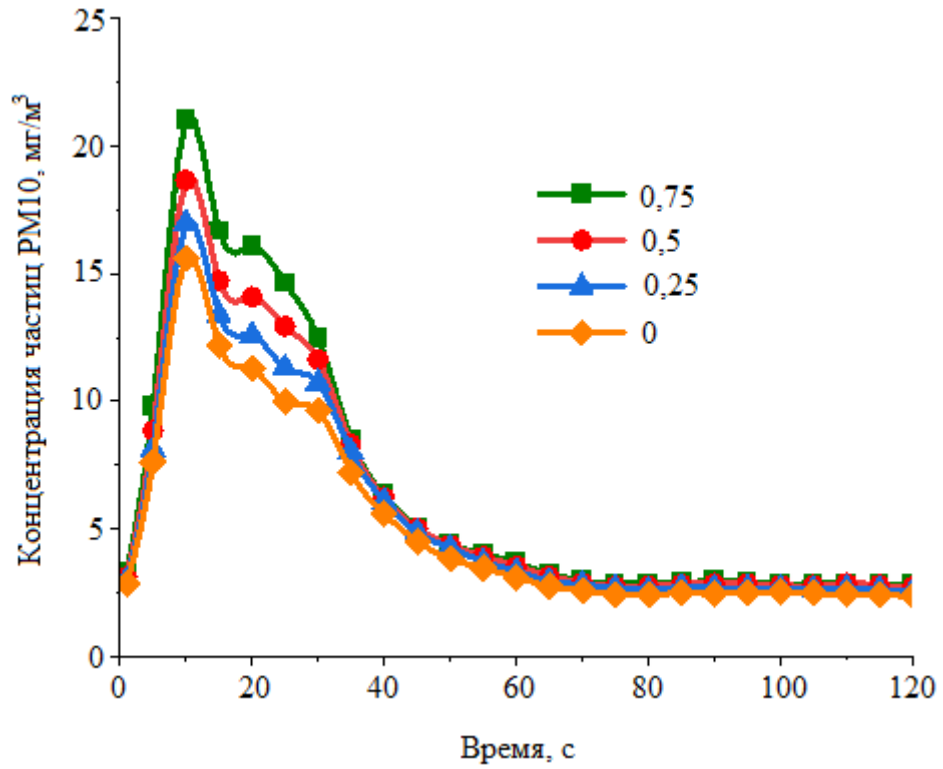


Рисунок 2.17 – Изменение концентрации частиц PM10 различной пористости в рабочей зоне

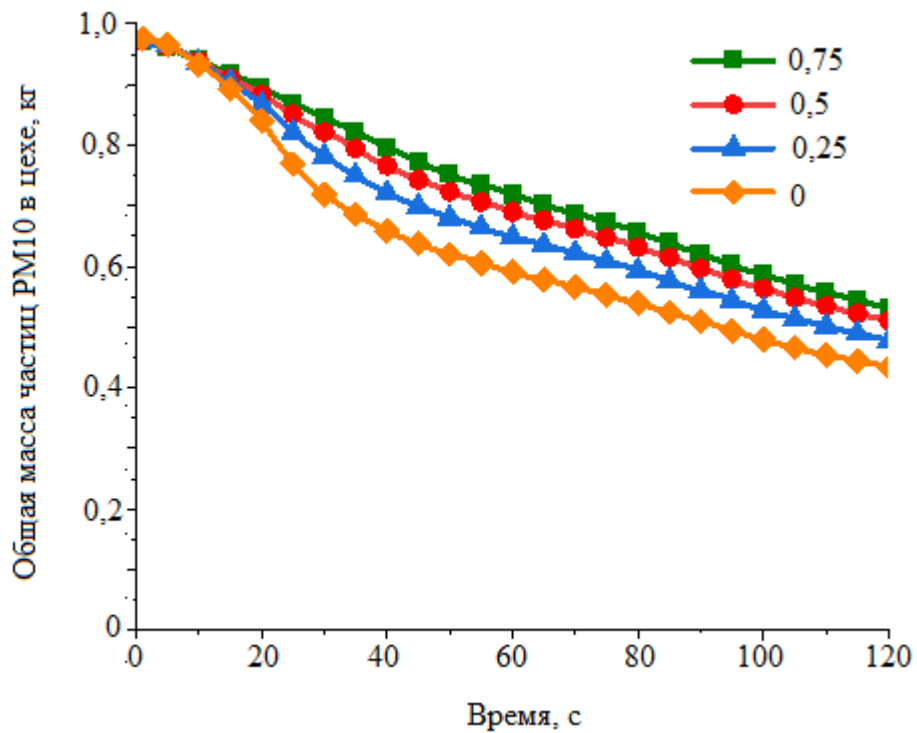


Рисунок 2.18 – Изменение общей массы частиц PM10 различной пористости в цехе

2.3.4 Аппроксимация расчётных данных и нормированная оценка влияния факторов

Результаты, представленные на рисунках 2.13–2.18, обработаны средствами Excel. Для определения относительной значимости факторов, влияющих на распространение сварочного аэрозоля в рабочей зоне, были выделены три группы параметров: скорость подачи воздуха u , размер частиц d_p и пористость частиц ε . В качестве основных интегральных показателей использовались средняя по времени концентрация частиц в рабочей зоне и средняя по времени суммарная масса частиц в объёме цеха:

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \int_0^T C(t) dt, \quad (2.3)$$

а средняя по времени суммарная масса частиц в объёме цеха – по выражению:

$$\bar{M} = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt, \quad (2.4)$$

где $C(t)$ – концентрация частиц в рабочей зоне в момент времени t ;

$M(t)$ – суммарная масса частиц в объёме цеха;

T – расчётный интервал времени.

Для оценки влияния скорости подачи воздуха на удаление частиц PM10 была получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$\bar{M}_{PM10}(u) = 5,9378 - 0,0947u, \quad R^2 = 0,890. \quad (2.5)$$

Полученная зависимость показывает, что увеличение скорости подачи воздуха приводит к снижению средней по времени суммарной массы частиц PM10 в объёме цеха. Это свидетельствует о том, что повышение скорости подачи воздуха усиливает вынос загрязнённых воздушных масс системой вентиляции и является одним из основных факторов, определяющих эффективность удаления сварочного аэрозоля.

Влияние размера частиц на среднюю концентрацию в рабочей зоне описывалось эмпирической зависимостью:

$$\bar{C}(d_p) = \frac{6,952}{1 + \left(\frac{d_p}{13,349}\right)^{3,607}}, R^2 = 0,999. \quad (2.6)$$

Данная зависимость показывает, что с увеличением размера частиц средняя концентрация в рабочей зоне уменьшается. Наиболее высокие значения концентрации характерны для мелкодисперсных частиц PM1–PM5, что связано с их повышенной способностью к длительному пребыванию в зоне дыхания работников. Более крупные частицы быстрее удаляются из рабочей зоны или осаждаются под действием силы тяжести.

Влияние пористости частиц PM10 на среднюю концентрацию в рабочей зоне описывалось эмпирической зависимостью:

$$\bar{C}_{PM10}(\varepsilon) = 0,6382 + 0,1331\varepsilon, R^2 = 0,972. \quad (2.7)$$

Для средней по времени суммарной массы частиц PM10 в объёме цеха получена зависимость:

$$\bar{M}_{PM10}(\varepsilon) = 5,1935 + 1,8587\varepsilon, R^2 = 0,999. \quad (2.8)$$

Эти зависимости показывают, что увеличение пористости частиц приводит к росту их концентрации и суммарной массы в объёме цеха. Это может быть связано со снижением эффективной плотности пористых частиц и, как следствие, с уменьшением их склонности к осаждению. Однако влияние пористости выражено слабее, чем влияние скорости подачи воздуха и размера частиц.

Для сопоставления влияния различных факторов был введён нормированный показатель влияния [144]:

$$I_X = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{Y_{\min}} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

где X – рассматриваемый фактор; Y_{\max} и Y_{\min} – максимальное и минимальное значения выбранного интегрального показателя в пределах исследуемого диапазона изменения данного фактора.

Результаты расчета нормированного показателя влияния представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты нормированного сравнения

Фактор	Рассматриваемый показатель	Диапазон изменения	Нормированный показатель влияния
Скорость подачи воздуха u	\bar{M}_{PM10}	5–20 м/с	36,7%
Размер частиц d_p	\bar{C} для PM1–PM10	1–10 мкм	35,4%
Пористость частиц ε	\bar{C}_{PM10}	0–0,75	15,9%

Таким образом, для рассматриваемых расчётных условий относительная значимость факторов, влияющих на распространение сварочного аэрозоля в рабочей зоне, может быть представлена в следующем виде:

$$I_u > I_{d_p} > I_\varepsilon. \quad (2.10)$$

Это означает, что при проектировании систем вентиляции и пылеудаления крупных сварочных цехов первоочередное внимание следует уделять оптимизации скорости подачи воздуха и структуры воздушных потоков. Влияние дисперсного состава частиц также является существенным, особенно для мелкодисперсных фракций PM1–PM10, которые способны длительно сохраняться в зоне дыхания работников. Пористость частиц оказывает дополнительное влияние на процесс переноса сварочного аэрозоля, однако в исследованном диапазоне её влияние является менее выраженным. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве основы для дальнейшей оптимизации параметров вентиляции и разработки более эффективных схем удаления сварочного аэрозоля из рабочей зоны.

2.4 Анализ результатов численного моделирования различных вариантов общеобменной вентиляции

Процедура моделирования состоит в следующем:

- транзитный расчёт поля течения на интервале 360 с: при этом в первые 60 с осуществлялась подача аэрозоля для имитации процесса сварки, в последующие 300 с подача частиц прекращалась (завершение работы);

– по полученным «снимкам» поля концентрации в разные моменты времени оценивалась способность каждой вентиляционной схемы к очистке воздуха от сварочного аэрозоля.

При проектировании вентиляции цеха должны соблюдаться требования: кратность воздухообмена не меньше 2, средняя концентрация частиц не больше 4 мг/м^3 , а скорость воздушного потока не должна превышать значений, допустимых для соответствующего вида сварки. Предельные скорости для различных технологий сварки приведены ниже; их превышение негативно сказывается на качестве сварного соединения [20]:

- ручная дуговая сварка плавящимся электродом (SMAW/MIG) – 1,2 м/с;
- сварка в среде защитного газа плавящимся электродом (GMAW/стержень) – 0,5 м/с;
- сварка вольфрамовым электродом в защитной газовой среде (GTAW/TIG) – 0,3 м/с.

В соответствии с вышеупомянутыми ограничениями и структурными характеристиками сварочного цеха в данном исследовании выбран коэффициент воздухообмена 3,6. Для объема приточного воздуха исследуемой зоны это соответствует $129\,600 \text{ м}^3/\text{ч}$. На основании конфигурации вентиляционной системы, показанной на рисунке 2.7, скорость приточного воздуха для варианта 1 составляет 3 м/с, а для вариантов 2 и 3 – 2 м/с. Основные расчётные параметры трёх вентиляционных схем приведены в Таблица 2.3.

Таблица 2.3 – Основные рабочие параметры вентиляционных систем

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Тип системы	подача сверху– вытяжка снизу	подача снизу – вытяжка сверху	подача снизу – вытяжка сверху
Направление подачи	постоянное	постоянное	изменяемое (период 60 с)
Скорость истечения	3 м/с	2 м/с	≈2 м/с
Расход воздуха	$129\,600 \text{ м}^3/\text{ч}$	$129\,600 \text{ м}^3/\text{ч}$	$129\,600 \text{ м}^3/\text{ч}$
Кратность воздухообмена	$3,6 \text{ ч}^{-1}$	$3,6 \text{ ч}^{-1}$	$3,6 \text{ ч}^{-1}$

2.4.1 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 1 (подача сверху– вытяжка снизу)

Система «подача сверху – вытяжка снизу» подает очищенный наружный воздух из верхней зоны через воздухораспределители, размещенные в воздуховодах в верхней части цеха. Поток приточного воздуха способствует перемещению загрязнений к вытяжным отверстиям в нижней части цеха. Высокая эффективность воздухообмена и малый температурный градиент делают такую схему экономичной и удобной для высоких сварочных цехов: она снижает энергозатраты на приток и исключает сквозняки в зоне обслуживания, обеспечивая скорости не более 0,5 м/с и сочетая энергосбережение с комфортом.

На рисунках 2.19 и 2.20 представлено распределение скорости и векторов скорости в вертикальной плоскости, проходящей через ось воздухораспределителей. Наглядно видно, что в нижней части цеха и под приточными отверстиями скорость во многих зонах превышает 1,2 м/с (красные области). В таких условиях необходимо устанавливать экраны у горелки во избежание негативного влияния приточных струй на процесс сварки [134].

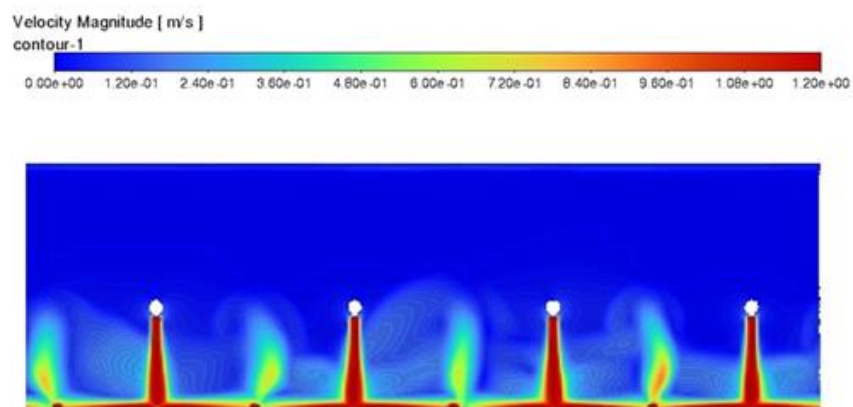


Рисунок 2.19 – Распределение скорости в вертикальной плоскости

При данной схеме концентрация частиц в отдельных областях выше допустимого предела (красное поле), и такая ситуация не меняется со временем (рисунок 2.21). Это указывает на слабое движение воздуха: наружный воздух не

достигает этих областей, что делает такую схему принципиально неэффективной с точки зрения ассимиляции вредностей.

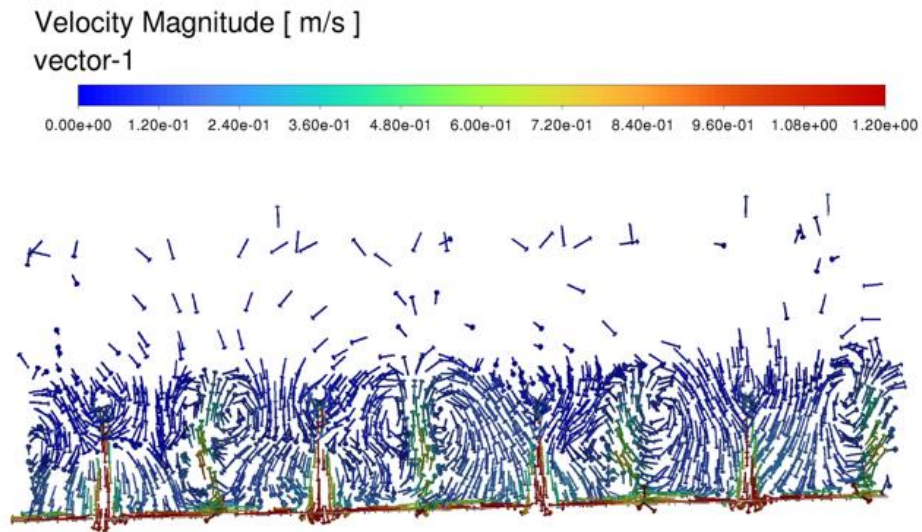


Рисунок 2.20 – Распределение векторов скорости в вертикальном сечении

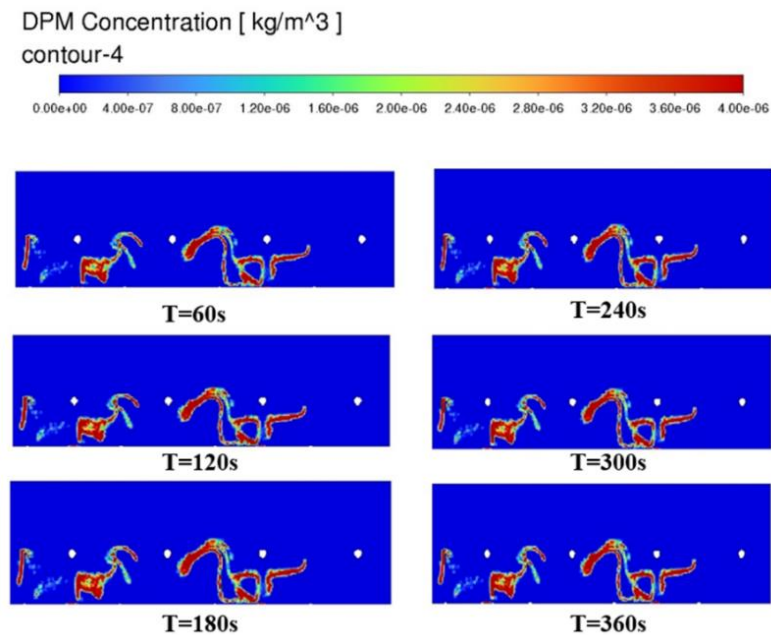


Рисунок 2.21 – Распределение концентрации сварочного аэрозоля в вертикальной плоскости

Кроме того, рассматривался случай, когда сварочный пост расположен непосредственно под приточным отверстием. Направление приточного потока противоположно термическому подъёму аэрозоля, что недопустимо в проектной практике. Поскольку в реальном цехе места сварки постоянно меняются, система «подача сверху – вытяжка снизу» для данного производства непригодна.

2.4.2 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 2 (подача снизу – вытяжка сверху)

Система «подача снизу – вытяжка сверху с переменным направлением подачи» подает обработанный воздух через низко расположенные сканирующие сопла, способные поворачиваться на $\pm 30\div 60^\circ$ в горизонтальной плоскости и изменять направление потока в реальном времени. За счёт разности плотностей формируется восходящий поток, таким образом создаётся подвижная «воздушная завеса» в продольной плоскости, способствующая непрерывному выталкиванию теплого загрязненного воздуха к верхним вытяжным отверстиям. В этом случае исключается образование зоны перегрева или застойных зон с повышенной концентрацией аэрозоля. Предлагаемый принцип управления позволяет поочерёдно усиливать удаление аэрозоля из различных рабочих зон, обеспечивая: скорость в рабочей зоне не больше 0,5 м/с, малый температурный градиент, высокую эффективность воздухообмена и заметное снижение энергозатрат.

В зоне истечения и по направлению потока скорость превышает 1,2 м/с на значительной площади (рисунок 2.22); при таком режиме у горелки необходимо устанавливать защитные экраны для предотвращения сдува сварочного факела.

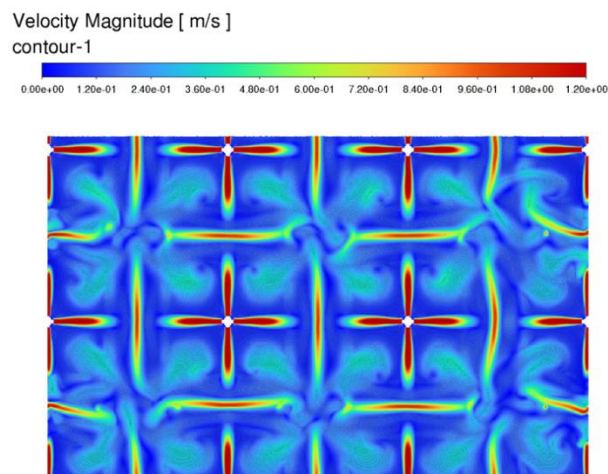


Рисунок 2.22 – Распределение скорости в рабочей зоне

При данной схеме концентрация частиц локально превышает допустимый уровень, кроме того, с течением времени «красные» зоны расширяются (рис. 2.23).

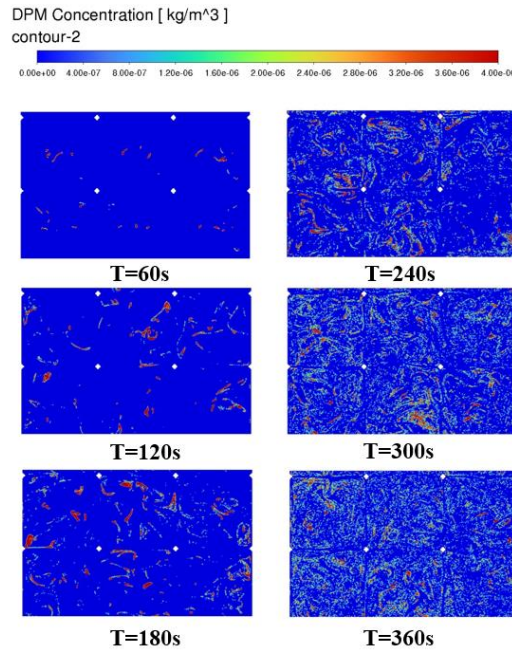


Рисунок 2.23 – Распределение концентрации в рабочей зоне

Причина увеличения зоны загрязнения заключается в том, что фиксированное направление подачи создает стационарное и неравномерное поле скоростей; при этом в зонах с низкой скоростью загрязнение практически не удаляется и лишь медленно диффундирует за пределы этих зон. Таким образом, за 360 с после окончания сварки сварочный аэрозоль охватил практически весь цех, поэтому данную систему применять нецелесообразно.

2.4.3 Анализ поля скорости и особенностей распределения концентрации частиц для варианта 2 (подача снизу – вытяжка сверху)

В крупнопролётных промышленных зданиях предложена схема «нижняя подача – верхняя вытяжка со сканирующими соплами». Обработанный воздух подаётся у пола через воздухораспределители, способные поворачивать поток на $\pm 30 \div 60^\circ$ в горизонтальной плоскости и изменять его направление в реальном времени, создавая подвижную «воздушную завесу» в продольной плоскости. За счёт разности плотностей формируется восходящий поток. Такое движение воздуха способствует непрерывному выталкиванию теплого загрязненного воздуха

к вытяжным отверстиям в верхней зоне цеха. Секционное управление позволяет поочередно усиливать удаление дыма в различных рабочих зонах, обеспечивая гибкий режим: скорость в рабочей зоне не превышает 0,5 м/с, малый температурный градиент, высокая эффективность воздухообмена и заметное снижение энергозатрат.

На рисунке 2.24 показано поле скоростей за один период работы системы «подача снизу – вытяжка сверху» с изменяемым направлением подачи [134]. Видно, что во многих зонах скорость превышает 1,2 м/с; у сварочной горелки также необходимы защитные экраны.

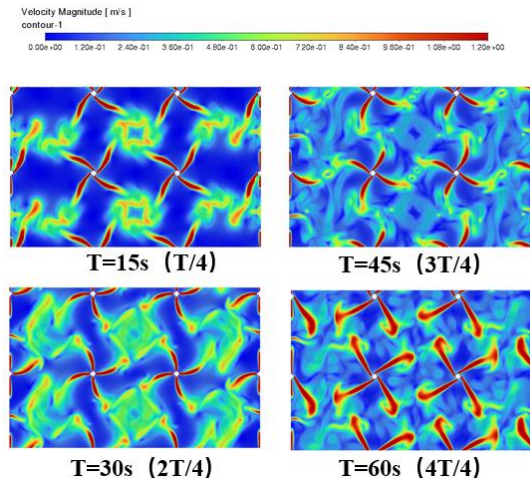


Рисунок 2.24 – Распределение скорости в рабочей зоне

Рисунок 2.25 демонстрирует, что через 120 с после прекращения сварки концентрация частиц в большей части цеха опустилась ниже допустимого уровня. С учётом допущений, разрешающих превышение концентрации 4 мг/м³ в 20 % точек измерений при максимальной величине не более 6 мг/м³ [20], к моменту времени 240 с концентрация во всех рабочих зонах соответствует ПДК.

В реальных производственных условиях ожидать 240 с до достижения допустимой концентрации невозможно. Для ускорения очистки воздуха, согласно результатам, полученным в п. 2.3.1, увеличивают скорость подачи, что резко снижает время удаления частиц. Поэтому при той же схеме «подача снизу – вытяжка сверху» приточный расход повышен до 324000 м³/ч, кратность

воздухообмена – до 9 ч^{-1} , а скорость истечения достигает 5 м/с ; далее необходимо оценить скорость очистки от сварочного аэрозоля.

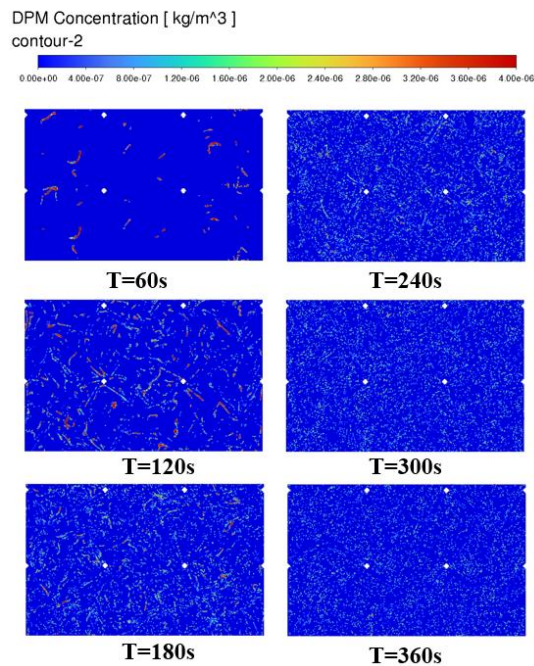


Рисунок 2.25 – Распределение концентрации в рабочей зоне

В большей части помещения скорость превышает $1,2 \text{ м/с}$ (рисунок 2.26), и наблюдаются выраженные вихревые структуры, направление потока в любой точке цеха периодически меняется, поэтому невозможно эффективно защитить сварочный процесс даже с помощью экранов.

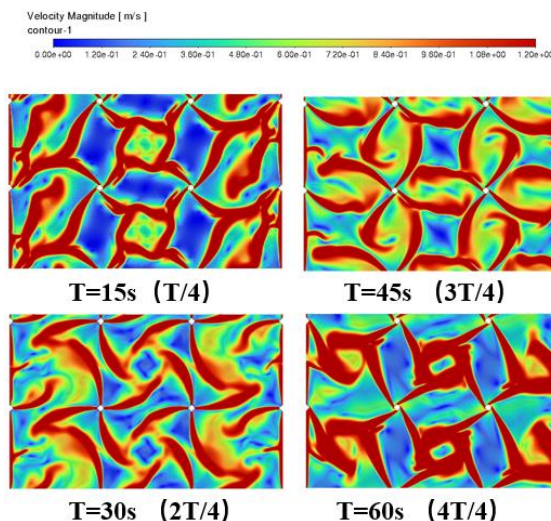


Рисунок 2.26 – Распределение скорости в рабочей зоне

По сравнению с системой при кратности 3,6 ч⁻¹ (скорость 2 м/с) площадь превышения ПДК к 60-секундному моменту заметно увеличилась (рисунок 2.27).

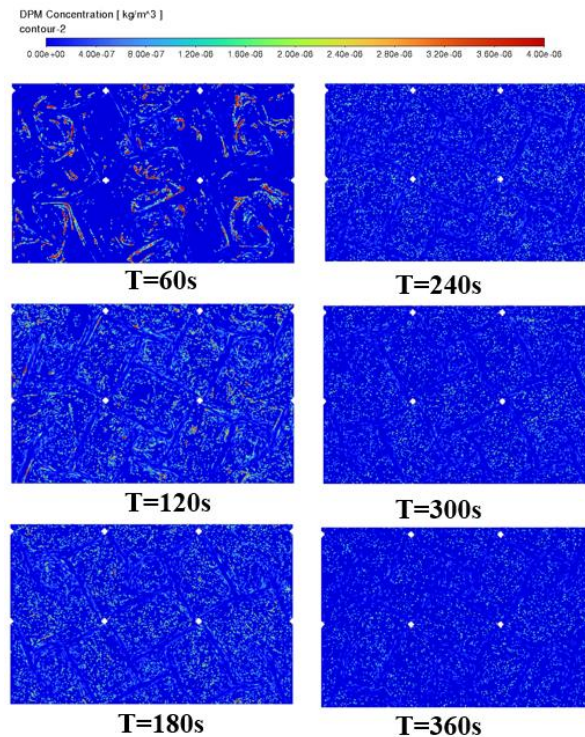


Рисунок 2.27 – Распределение концентрации в рабочей зоне

Причина – увеличение скорости подачи ускоряет как распространение аэрозоля, так и его удаление. К моменту времени 180 с (120 с после окончания сварки) концентрация в цехе, в основном, соответствует ПДК. Хотя время достижения допустимого уровня концентрации сократилось, но оно всё ещё остаётся значительным; к тому же требуется большой расход воздуха и повышенный расход энергии, что не позволяет рекомендовать данный режим для практического применения.

2.5 Выводы

Проведены натурные исследования характеристик сварочного аэрозоля в сварочном цехе и лабораторных условиях, получен дисперсный состав твердых частиц на рабочем месте сварщика. Определена зависимость концентрации твердых частиц от времени. Получена функция распределения относительной

концентрации твердых частиц.

Разработана численная модель системы вентиляции сварочного цеха. В процессе численного моделирования исследован процесс пылеудаления в системе вентиляции большого сварочного цеха с использованием средств общеобменной вентиляции. Выявлено, что скорость подачи воздуха в системе вентиляции, а также размер частиц и пористость дыма и пыли значительно влияют на процесс пылеудаления. Эти факторы необходимо учитывать при проведении исследований систем вентиляции. Предложены три варианта системы вентиляции и выполнено сравнение эффективности с точки зрения удаления сварочного аэрозоля (пыли), что позволило сделать следующие выводы:

- на систему «подача сверху/удаление снизу» значительно влияет относительное расположение приточных вентиляционных отверстий и точек сварки. Такая конфигурация вентиляции не подходит для сварочных цехов, в которых отсутствуют фиксированные места сварки;

- система с постоянным расходом воздуха демонстрирует менее эффективное удаление вредностей из-за фиксированного пути воздушного потока;

- системы вентиляции с переменным направлением подачи воздуха имеют наиболее высокие показатели ассимиляции вредностей и эффективности пылеудаления;

- в целом, общеобменные системы вентиляции обладают ограниченными возможностями по пылеудалению. Наиболее целесообразным вариантом является вариант с переменным направлением подачи воздуха, дополненный современным местным устройством для удаления и очистки воздуха от сварочного аэрозоля.

3 Разработка и исследование местной системы вытяжной вентиляции

3.1 Разработка новой передвижной водяной установки для улавливания пыли

3.1.1 Конструкция передвижной установки мокрого пылеулавливания с водяной ванной

В настоящее время разработаны различные конструкции передвижных установок местной вентиляции и пылеудаления [74, 115, 116, 145–148]. За основу разработки новой установки принята традиционная установка (рисунок 3.1), которая представляет собой гибкое и высокоэффективное очистное оборудование, специально разработанное для рабочих мест с высоким уровнем загрязнения, таких как сварка. Ключевые особенности установки — высокая подвижность и адаптивность: благодаря колёсному шасси или лёгкой конструкции установку можно быстро развернуть и переместить, что идеально соответствует производственным условиям в цехах с большим количеством рабочих мест и частым изменением расположения сварочных точек по ходу технологического процесса. Установка объединяет высокоэффективный вытяжной зонтик и фильтрующий картриджный пылеуловитель, что позволяет точно улавливать сварочный дым в месте его образования и существенно повышать эффективность захвата вредных веществ. Кроме того, она оснащена вентилятором с частотным регулированием, позволяющим изменять расход воздуха в зависимости от реальных условий работы, обеспечивая при этом стабильную эффективность пылеудаления, а также снижение потребления энергии и уровня шума. Данная установка не требует сложного монтажа встроенных воздуховодов, отличается простотой установки и низкими эксплуатационными затратами, являясь оптимальным решением для локального контроля загрязнений в высоких и крупногабаритных помещениях, особенно в условиях современных производств, где предъявляются повышенные требования к гибкости и оперативности реагирования.

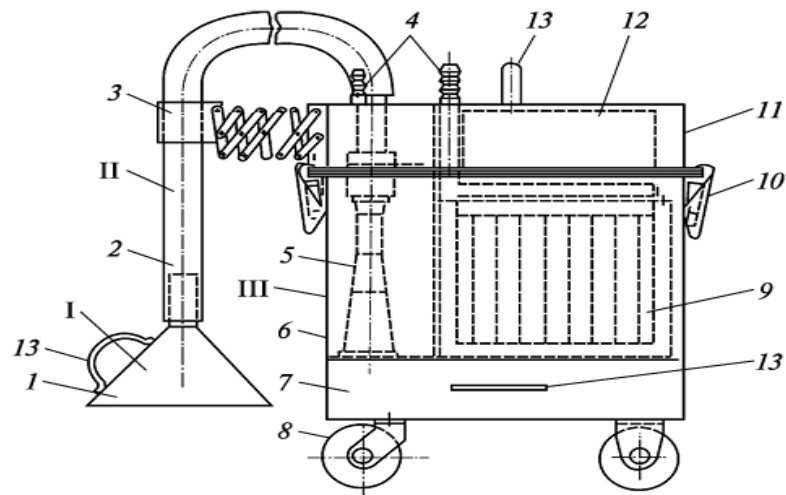


Рисунок 3.1 – Традиционная передвижная местная фильтровентиляционная установка
 1 — пылегазоприемник для удаления сварочных газов; 2 — эластичный воздуховод; 3 — шарнирно-фиксирующая опора; 4 — штуцеры сжатого воздуха эжектора и импульсной продувки; 5 — эжектор; 6 — корпус очистного аппарата; 7 — емкость для пыли; 8 — колеса; 9 — ячеистый тканевый фильтр; 10 — зажимы; 11 — съемная крышка; 12 — сорбент; 13 — ручки;

I — пылегазоприемник; II — шарнирно-фиксирующая опора; III — очистной аппарат [148]

Несмотря на такие преимущества, как компактность конструкции и гибкость размещения, в практическом применении данное оборудование имеет ряд существенных недостатков: во-первых, эффективность пылеудаления быстро снижается по мере увеличения времени работы — по мере накопления слоя пыли на поверхности фильтра сопротивление воздушному потоку резко возрастает; при несвоевременной или неполной очистке фильтра не только уменьшается расход воздуха, но и значительно падает эффективность улавливания загрязняющих веществ; во-вторых, из-за ограничений по размеру пор фильтрующего материала и механизмов проникновения частиц эффективность удаления субмикронных частиц (особенно наиболее опасных и легко распространяющихся PM1) в целом невысока, что затрудняет соблюдение строгих требований к охране здоровья работников и экологическим нормам; кроме того, высокоэффективные фильтрующие элементы (например, картриджи класса H13 и выше), применяемые для повышения производительности фильтрации, обладают высокой стоимостью, а их срок службы существенно зависит от пылевой нагрузки и метода регенерации, что

приводит к значительному увеличению эксплуатационных расходов в долгосрочной перспективе. Перечисленные проблемы серьёзно ограничивают устойчивое применение традиционных фильтрующих передвижных установок пылеудаления для локализации сварочного аэрозоля, характеризующегося высокой концентрацией и доминированием мелкодисперсных частиц.

В диссертационном исследовании предложены две новые конструкции установок мокрого пылеулавливания с водяной ванной, в которых для увеличения площади контакта между газовой и жидкой фазами используются соответственно аэратор и лопастной смеситель [125, 126].

3.1.2 Конструкция и принцип работы новой передвижной водяной пылеуловительной установки с аэратором

На рисунке 3.2 представлена схема водяного пылесборника с аэратором. В данном пылеулавливающем устройстве сварочный аэрозоль из вытяжного зонта подаётся снизу в пылесборный бак, заполненный водой. Запылённый газ проходит через слой воды, после чего под действием архимедовой силы поднимается вверх. В процессе всплытия частицы, содержащиеся в газе, улавливаются каплями жидкости на поверхности контакта газовой и жидкой фаз. Для увеличения площади контакта в воде установлен аэратор для диспергирования пузырьков.

Основным элементом данной установки пылеудаления является пылесборник 5, который был выбран в качестве объекта для численного моделирования и построения математической модели. Поперечное сечение пылесборника в горизонтальной плоскости представляет собой прямоугольник размером 0,3 м × 0,3 м, высота пылесборника составляет 0,6 м, уровень жидкости – 0,3 м. Вход газа в нижней части корпуса выполнен в виде круглого отверстия диаметром 0,03 м. В нижней части пылесборника установлен полусферический аэратор с металлической сеткой; диаметр полусферы – 0,06 м.

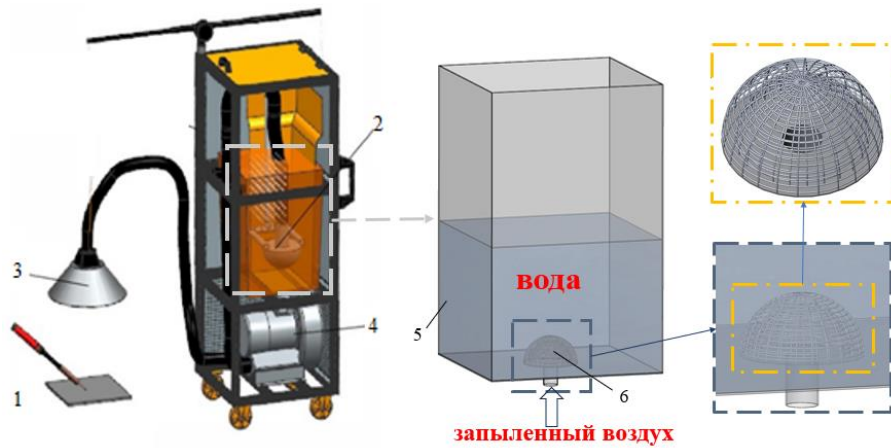


Рисунок 3.2 – Схема конструкции водяного пылесборника с аэратором

1 – зона сварочных работ; 2 – передвижная установка; 3 – пылеприемник; 4 – вентилятор; 5 – пылесборник; 6 – аэратор с металлической сеткой

3.1.3 Конструкция и принцип работы новой передвижной водяной пылеуловительной установки с мешалкой

Конструктивные особенности установки приведены на рисунках 3.3–3.8. Запыленный воздух со дна пылесборника поступает в циклон-пылесборник, на дне пылесборника находится жидкая среда (высота 0,1–0,2 метра). Благодаря циклону и перемешивающим лопастям, воздух в жидкой среде полностью растворяется, взвешенные мелкие частицы из воздуха улавливаются жидкостью. Далее воздух движется вверх, а через форсунку происходит распыление жидкости. Затем воздух попадает в зону осушения (демистинга), которая имеет большое количество тонких волоконных нитей, используемых для удаления влаги из воздуха.

Рабочий процесс улавливания сварочной пыли заключается в следующем: дымовые газы, образующиеся при сварке, улавливаются пылеприемником 1 за счет воздуходувки 3. Через гофрированную соединительную трубу 2, соединитель 5 и входную трубу 8 вредности попадают в цилиндр пылесборника 7, в нижней части которого находится вода. Частицы дымовых газов адсорбируют жидкость. Для повышения эффективности очистки в цилиндре пылесборника установлена мешалка с лопатками (Рисунок 3.6 и 3.7), которые приводятся в движение с помощью электродвигателя 6 с регулятором скорости 4. Благодаря вращению

лопаток капли жидкости измельчаются, что способствует увеличению площади контакта ПЫЛЬ-ГАЗ-ЖИДКОСТЬ и, следовательно, повышению эффективности очистки.

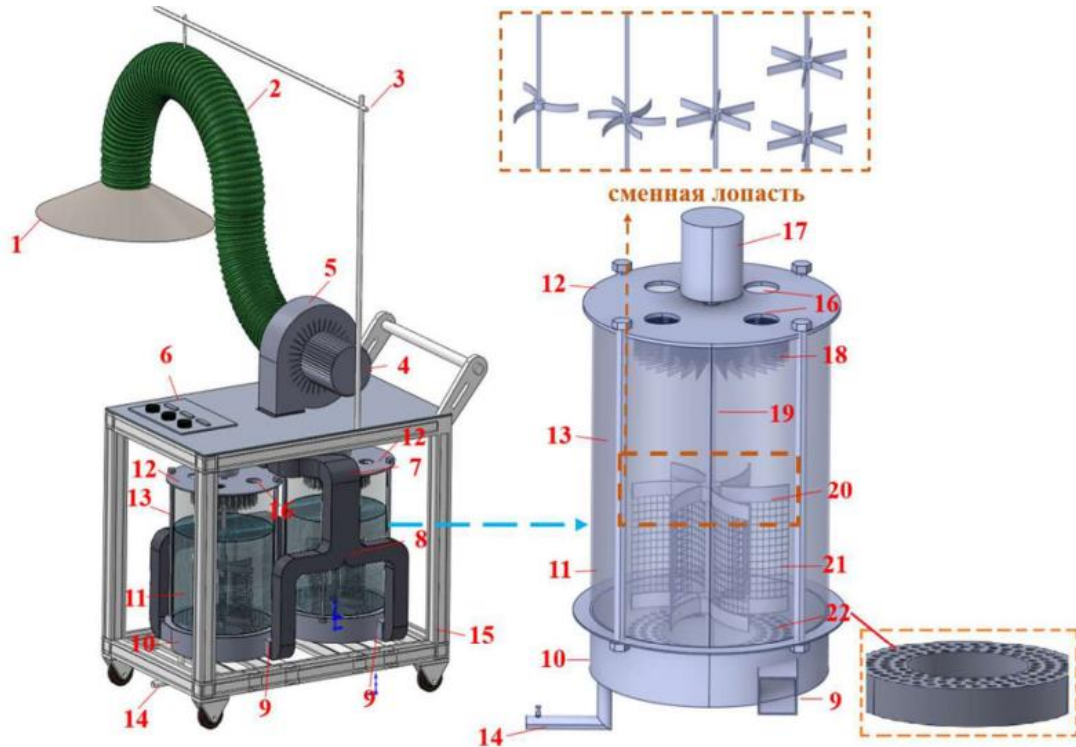


Рисунок 3.3 – Конструкция новой передвижной водяной пылеуловительной установки с перемешивающими лопастями

1 – пылеприемник; 2 – гофрированная соединительная труба; 3 – кронштейн; 4 – электродвигатель; 5 – вентилятор; 6 – панель управления; 7 – воздуховод; 8 – распределитель потоков; 9 – входная труба пылесборника; 10 – дно пылесборника; 11 – корпус пылесборника; 12 – крышка пылесборника; 13 – внешние шпильки пылесборника; 14 – водоотводящая труба; 15 – кронштейн; 16 – выпускное отверстие пылесборника; 17 – двигатель мешалки; 18 – волокно для осушения; 19 – вал мешалки; 20 – лопасть мешалки; 21 – проволочная сетка; 22 – газораспределитель

Для устойчивой фиксации смесительного вала в месте соединения пылесборного цилиндра и смесительного вала установлен подшипник. Диаметр вала 12 мм, диаметр основания – 30 мм. В верхней части пылесборного цилиндра (Рисунок 3.5) для повышения эффективности очистки установлены форсунки, к которым через распылительный трубопровод 12 и распылительные насосы 11 из бака 10 подается жидкость. Для исключения выноса капель в верхней части

пылесборного цилиндра перед выхлопным отверстием 9 установлено туманоулавливающее устройство.

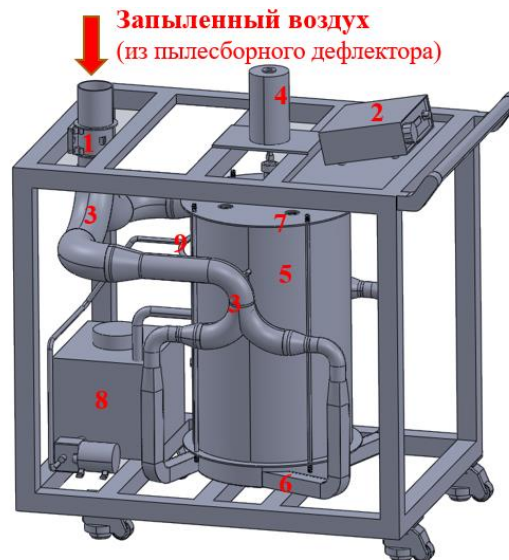


Рисунок 3.4 – Подробный состав конструкции и размеры

1 – аксиальный воздуходувка; 2 – регулятор скорости; 3 – перераспределитель; 4 – электродвигатель мешалки; 5 – цилиндр пылесборники; 6 – входная труба; 7 – выходное отверстие; 8 – аккумуляторный бак; 9 – спринклерная труба

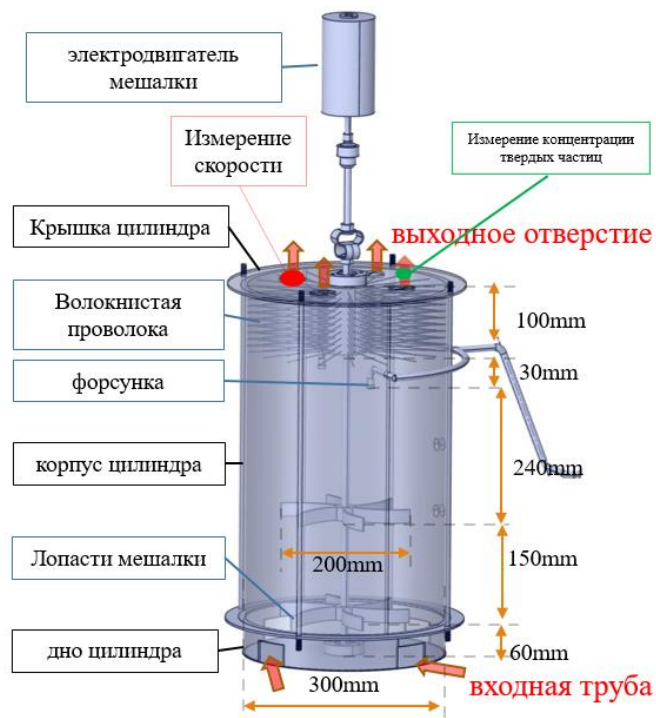


Рисунок 3.5 – Схема конструкции пылеулавливающего цилиндра

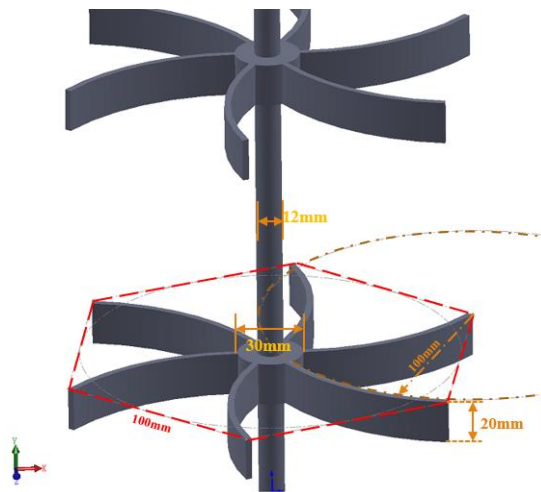


Рисунок 3.6 – Параметры лопастей



Рисунок 3.7 – Фотография перемешивающей лопасти и туманоулавливающей волоконной нити

Пылеулавливающий цилиндр разделен на три части: дно цилиндра, корпус цилиндра и съемная крышка цилиндра. Эти три части опираются на внешние шпильки для соединения друг с другом. Диаметр цилиндра 300 мм, внутри находится смесительный вал, установленный с двумя смесительными лопастями (Рисунок 3.6 и 3.7) диаметром 200 мм. Нижняя лопасть расположена на высоте 60 мм от дна цилиндра, расстояние между лопастями 150 мм.

В верхней части цилиндра пылеудаления установлены форсунки на расстоянии 450 мм до дна цилиндра, выше форсунок на расстоянии 30 мм расположены туманоулавливающие волокна, высота которых составляет 100 мм.

В крышке цилиндра находятся четыре круглых выпускных отверстия диаметром 40 мм. Для измерения концентрации частиц в очищенном газе в потоке воздуха может быть использовано любое из двух выходных отверстий.

В варианте 3 предусмотрены две концентрические полусферические металлические сетки: внутренняя сетка диаметром 0,06 м и внешняя – диаметром 0,08 м. Металлические сетки расположены друг относительно друга под углом 5° по дуге окружности, при этом их ячейки перекрещиваются. Диаметр проволоки сеток составляет 0,001 м, материал – нержавеющая сталь.

Форма смесительных лопастей представляет собой пространственную двумерную поверхность с шестью лопастями, вершины лопастей представляют собой правильный шестиугольник, длина сторон которого составляет 100 мм. Лопасты имеют форму дуг окружностей радиусами 100 мм и центрами, лежащими в вершинах правильного шестиугольника. Высота лопастей составляет 20 мм, толщина – 3 мм.

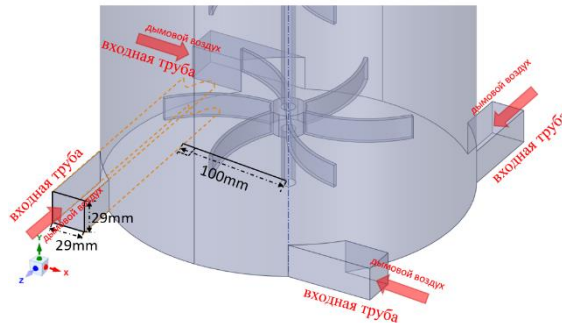


Рисунок 3.8 – Схематичное изображение структуры соединения впускного трубопровода пылесборника

Как показано на Рисунок 3.8, в нижней части цилиндра находится входное отверстие для загрязненного воздуха, входная труба имеет квадратное сечение с длиной стороны 29 мм, а вертикальное расстояние между входной трубой (секция вверх) и осью смесительного вала составляет 100 мм.

3.2 Численное исследование эффективности пылеулавливания

Согласно результатам анализа научной литературы, мокрая очистка воздуха обладает высокой эффективностью удаления частиц PM1 при сравнительно низкой эксплуатационной стоимости. В рамках данного исследования на основе механизмов мокрой очистки разработано новое устройство для водяной ванны, а для выбора наиболее эффективного варианта конструкции разработана математическая модель устройства.

Модель построена на основе вычислительной гидродинамики (CFD) и использует метод Эйлера–Эйлера [149] для описания двухфазного потока газ–жидкость. При этом прямое отслеживание дисперсных твердых частиц (например, сварочной пыли PM1) не производится. Вместо этого акцент смещается на фундаментальные физические процессы, определяющие эффективность очистки – а именно, на эффективную площадь контакта между газом и жидкостью. Поскольку в мокрой очистке удаление загрязняющих веществ (особенно твердых частиц субмикронного размера), в основном, происходит за счет инерционного столкновения, перехвата, диффузии и коагуляции частиц с поверхностью капель или пленки жидкости, вероятность этих процессов напрямую коррелирует с площадью межфазной поверхности. Поэтому в настоящем исследовании в качестве ключевого целевого показателя для оптимизации и оценки эффективности выбрана удельная межфазная площадь (*specific interfacial area*), рассчитываемая как площадь контакта газ–жидкость на единицу объема.

Для моделирования взаимодействия газовой и жидкой фаз применяется модель баланса популяции (*Population Balance Model, PBM*), интегрированная с решателем CFD [150], что позволяет точно воспроизвести динамическое поведение пузырьков в условиях турбулентного потока, создаваемого мешалкой. Механизм дробления пузырьков моделируется с помощью классической модели Луо–Свендсена [151], основанной на скорости диссипации турбулентной кинетической энергии и числе Вебера пузырьков, что обеспечивает надежное предсказание первичного дробления пузырьков в условиях высокой турбулентности. Процесс

коагуляции пузырьков моделируется комплексно, с учётом броуновского движения, столкновений в турбулентных вихрях и сдвигового индуцированного слияния [152].

Учитывая особенности внутренней конструкции пылеуловителя – подача запыленного воздуха через распределительное устройство в нижней части резервуара с заданным расходом, формирующего начальную группу пузырьков, которые затем всплывают под действием силы Архимеда, — для моделирования вращательного движения мешалки используется метод множественных систем отсчета (Multiple Reference Frame, MRF) [153]. Это позволяет эффективно моделировать сильные сдвиговые потоки, индуцируемые лопастями мешалки, и их критическое влияние на распределение размеров пузырьков, пространственную концентрацию и скорость обновления межфазной поверхности.

Посредством данной модели можно количественно определить закономерности пространственно-временной эволюции удельной межфазной площади при различных параметрах: частоте вращения мешалки, расходе газа, уровне жидкости и геометрии лопастей. Полученные результаты служат прочной теоретической основой и путеводителем для проектирования высокоэффективных и экономичных установок мокрой очистки с водяной ванной.

Модель PBM (Population Balance Model)

Методы решения Уравнения баланса популяций (Population Balance Equation, PBE) [154] обычно решают четырьмя основными методами: дискретным методом, стандартным методом моментов, квадратурным методом моментов и прямым квадратурным методом моментов. Целью данного исследования является получение площади контакта между газовой и жидкой фазами. Дискретный метод является наиболее распространённым способом решения задачи распределения частиц по размерам (Particle Size Distribution, PSD) в рамках модели баланса популяций (PBM). Суть данного метода заключается в разделении дисперсной фазы (в настоящем исследовании — пузырьков) на несколько подинтервалов и аппроксимации непрерывного распределения по размерам конечным набором дискретных размерных классов. Этот метод требует минимального числа

неизвестных и обладает наибольшей вычислительной скоростью по сравнению с другими четырьмя подходами.

Модель РВМ широко применяется при численном моделировании многофазных течений [155]. Она решается на основе уравнений, рассчитываемых в рамках CFD – в частности, уравнения неразрывности, уравнения количества движения и уравнений турбулентности. При этом в процессе моделирования необходимо учитывать явления дробления и коагуляции пузырьков; следовательно, при анализе сил, действующих на пузырьки, также следует учитывать их дробление и слияние.

Конкретный процесс решения соответствующих задач описан ниже:

1. Уравнения сохранения для процесса течения

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\alpha)_q + \nabla(\rho\alpha v)_q = 0, \quad (3.1)$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1,$$

$$\alpha_g = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l},$$

где m – масса, кг;

t – время, с;

ρ – плотность, кг/м³;

α – объёмная доля фазы;

v – скорость, м/с;

q – индекс обозначает соответствующую фазу: $q = l$ – жидкая фаза, $q = g$ – газовая фаза;

Q_l, Q_g – объёмные расходы газовой и жидкой фаз соответственно, м³/с.

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{D(mv)_q}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\alpha v)_q + \nabla(\rho\alpha v)_q = \nabla(D_v\alpha\nabla v)_q + M_{\varphi, q}, \quad (3.2)$$

$$M_{\varphi, q} = f_{pump, q} + f_{drag, q} + f_{vm, q} + f_{lift, q},$$

$$f_{pump, q} = - \left\{ \alpha \varphi \left[2\omega \times v + \omega \times (\omega \times r) + \frac{D\omega}{Dt} \times r \right] \right\}_q,$$

где $M_{\varphi, q}$ – внешняя результирующая сила, действующая на жидкость;

$f_{pump, q}$ – сила, обусловленная вращением лопастей мешалки;

$f_{drag, q}$ – сила сопротивления (дрейфа);

$f_{vm, q}$ – сила виртуальной массы;

$f_{lift, q}$ – подъёмная сила;

r – вектор, соединяющий центр вращения с единичным контрольным объёмом;

ω – угловая скорость вращения неинерциальной системы отсчёта, рад/с.

Сила сопротивления $f_{drag, q}$ – это противодействующая сила, препятствующая движению, возникающая вследствие разности скоростей на границе контакта газовой и жидкой фаз. В настоящем исследовании используется классическая модель Шиллера–Наумана; расчёт силы сопротивления, действующей на пузырьки, осуществляется следующим образом:

$$f_{drag, q} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_l \alpha_g}{d_b} |v_l - v_g| (v_l - v_g), \quad (3.3)$$

где d_b – средний диаметр Саутера пузырьков (диаметр Саутера), м.

Формула для расчёта коэффициента сопротивления C_D следующая:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0,15 \text{Re}^{0,678})}{\text{Re}} & (\text{Re} \leq 1000) \\ 0,44 & (\text{Re} > 1000) \end{cases}.$$

Число Рейнольдса Re характеризует разность скоростей между газовой и жидкой фазами и рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{Re} = \frac{\rho_l |v_l - v_g| d_b}{\mu_l},$$

где μ_l – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с.

Сила виртуальной массы $f_{vm, q}$ – это дополнительная сила, возникающая вследствие инерции жидкости при ускоренном движении дисперсной фазы относительно непрерывной фазы.

В данной работе используется модель силы виртуальной массы, основанная на уравнении движения малой сферической частицы, предложенном Макси и Райли [99]:

$$f_{vm, q} = C_{vm} \rho_l \alpha_g \left(\frac{dv_l}{dt} - \frac{dv_g}{dt} \right), \quad (3.4)$$

где C_{vm} – коэффициент виртуальной массы, обычно принимаемый равным 0,5.

В настоящей работе применяется модель подъёмной силы, предложенная Лежандром и Магноде [30], которая применима к сферическим дисперсным частицам малого диаметра.

Подъёмная сила $f_{lift, q}$ – это сила, действующая на дисперсные частицы в многофазных сдвиговых течениях из-за наличия градиента скорости в основном потоке. В настоящей работе применяется модель подъёмной силы, предложенная Лежандром и др. [102], которая применима к сферическим дисперсным частицам малого диаметра:

$$f_{lift, q} = -C_L \rho_l \alpha_g (v_l - v_g) \times (\nabla \times v_l), \quad (3.5)$$

где C_L – коэффициент подъёмной силы; для течения вокруг жёсткой изолированной сферы он принимается равным 0,5.

2. Модель турбулентности

В качестве модели турбулентности используется модель SST k – ω . Модель SST k – ω объединяет преимущества модели k – ε в условиях развитого свободного потока и модели k – ω в пристеночных слоях посредством специальной функции переключения и учёта членов перекрёстной диффузии. Благодаря сочетанию преимуществ модели k – ω в пристенной области и модели k – ε в области свободного потока модель SST k – ω обеспечивает устойчивое описание широкого класса течений, включая течения вблизи твёрдых стенок и в областях свободных сдвиговых слоёв [103].

Коэффициент динамической вязкости:

$$\mu_l = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} F_1)}. \quad (3.6)$$

Тензор скоростей деформации:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (3.7)$$

Уравнение переноса турбулентной кинетической энергии k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_i \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]. \quad (3.8)$$

Уравнение переноса удельной диссипации ω :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega \bar{u}_j)}{\partial x_j} = & \gamma S_{ij} S_{ij} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_i \sigma_{\omega 1}) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned}, \quad (3.9)$$

где $F_1 = \operatorname{tgh} \left\{ \left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{CD_{k\omega} y^2} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\}$ – функция смешения

(переключения);

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right);$$

$$\gamma = F_1 \gamma_1 + (1 - F_1) \gamma_2;$$

$$\beta = F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2.$$

Постоянные коэффициенты равны: $\alpha_1 = 0,31$; $\beta_1 = 0,075$; $\beta_2 = 0,0828$; $\beta^* = 0,09$; $\sigma_{\omega 1} = 0,5$; $\sigma_{\omega 2} = 0,856$; $\gamma_1 = 2,213$; $\gamma_2 = 1,761$.

3. Модель баланса популяций (РВМ)

Описание выполнено с использованием модели баланса популяций, предложенной Луо и др. [56].

Таким образом, сводная информация о моделях и параметрах настройки, использованных в данном исследовании, представлена ниже:

- метод расчета: simple;
- модель многофазного потока: РВМ-модель на основе модели Эйлера;
- модель разрушения пузырьков: Луо–модель;
- модель объединения пузырьков: Луо–модель;

- модель турбулентности: SST k - ω ;
- модель системы перемешивания: MRF;
- интервал времени: адаптивный интервал времени в зависимости от максимального числа Куранта;
- максимальное число Куранта равно 5;
- количество сеток: адаптивное шифрование сетки в соответствии с минимальным размером сетки;
- минимальный размер сетки: 0,5 мм;
- максимальный коэффициент искажения сетки: 0,6;
- минимальное ортогональное соотношение сетки: 0,2;
- Y^+ : меньше 5.

Допущения:

1. принято считать запыленный воздух чистым газом, аналогично загрязненную воду – чистой жидкостью;
2. основным фактором, влияющим на эффективность пылеудаления, является площадь контакта двух фаз – газа и жидкости.

3.2.1 Расчетная модель и граничные условия

Рассмотрено четыре варианта конструкции (рисунок 3.2):

- вариант 1: базовая конструкция; без дополнительных элементов;
- вариант 2: дополнение базовой конструкции однослойной металлической сеткой;
- вариант 3: дополнение базовой конструкции двухслойной металлической сеткой;
- вариант 4: дополнение базовой конструкции дополнительными двумя лопастями перемешивания.

Вариант 1 соответствует известной технологии мокрого способа пылеудаления при наличии в конструкции пылеуловителя водяной ванны. В

вариантах 2 и 3 используют, соответственно одно- и двухслойные металлические сетки для уменьшения размеров пузырьков воздуха.

Теоретически, дальнейшее увеличение количества слоев металлической сетки может привести к увеличению площади контакта двух фаз, однако это значительно увеличивает сопротивление устройства, ограничивает скорость движения потока и требует более частой регенерации. Предлагается вариант 4, который позволяет решить проблему засорения с использованием перемешивающих лопастей. Конкретная конструкция представлена на рисунке 3.3.

Использовано коммерческое программное обеспечение [156] для моделирования процесса взаимодействия газа и жидкости. Процессы движения газа через жидкость высотой 0,2 м показаны на Рисунок 3.9–3.12. Площадь контакта двух фаз, газа и жидкости, рассчитывается методом интегрирования (рисунок 3.13).

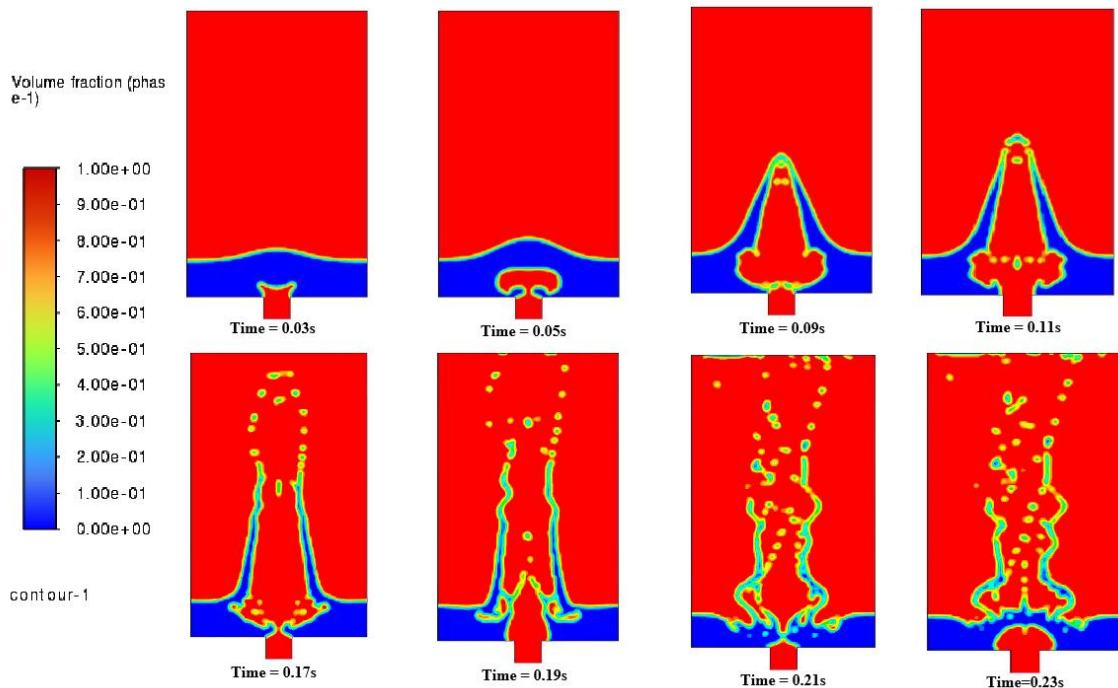


Рисунок 3.9 – Процесс движения газа в варианте 1

Для варианта 1, когда воздух поступает непосредственно из нижней части пылесборника в воду, результаты моделирования (рисунок 3.9) показывают, что поскольку отсутствует устройство для измельчения, пузырьки воздуха

укрупняются и через промежуток времени $t = 0,11$ с прорывают поверхность жидкости. Затем под действием поверхностного натяжения жидкости образуются жидкая пленка и капли ($t = 0,17$ с). Далее жидкая пленка под действием силы тяжести опускается, но быстро достигает равновесия под действием импульса воздушного потока ($t = 0,21$ с), после чего жидкость в пылесборнике достигает практически стабильного состояния ($t = 0,23$ с).

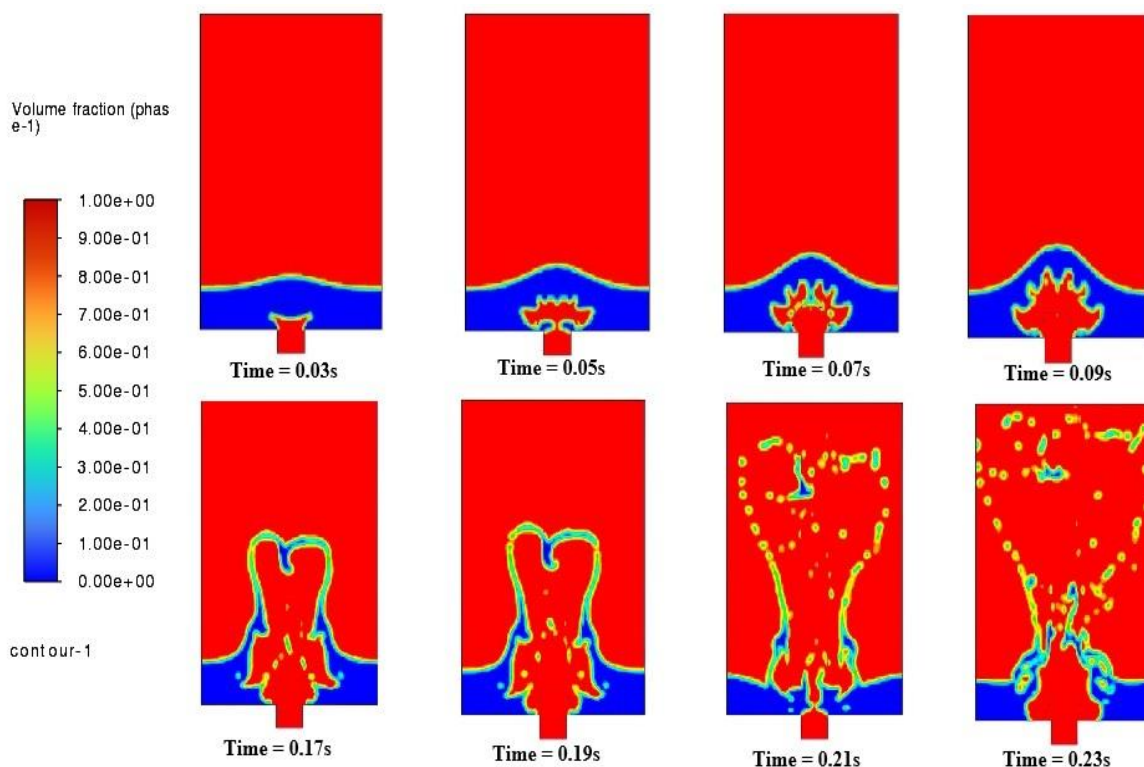


Рисунок 3.10 – Процесс движения газа в варианте 2

На Рисунок 3.10 видно, что при взаимодействии с однослойной сеткой (вариант 2) воздух частично распределяется в воде, одновременно под действием сил плавучести движется вверх, прорывает поверхность и постепенно достигает стабильного состояния с существенным расширением зоны взаимодействия.

При взаимодействии с двухслойной металлической сеткой (рисунок 3.11) пылевоздушный поток разбивается на несколько потоков в разных направлениях, одновременно движется вверх под действием плавучести, прорывает поверхность и постепенно достигает стабильного состояния под действием силы тяжести, импульса воздушного потока и поверхностного натяжения капель. Это состояние

имеет явные отличия от данных на рисунках 3.9 и 3.10, на которых на границе раздела фаз газа и жидкости образуется структура, близкая к шаровой ($t = 0,15$ с, $t = 0,20$ с), а в верхней части воздушный поток прорывает жидкую пленку, при этом образуются прерывистая жидкая пленка и капли. Благодаря наличию жидкой пленки площадь контакта газа и жидкости в данном варианте значительно больше, чем в двух предыдущих вариантах.

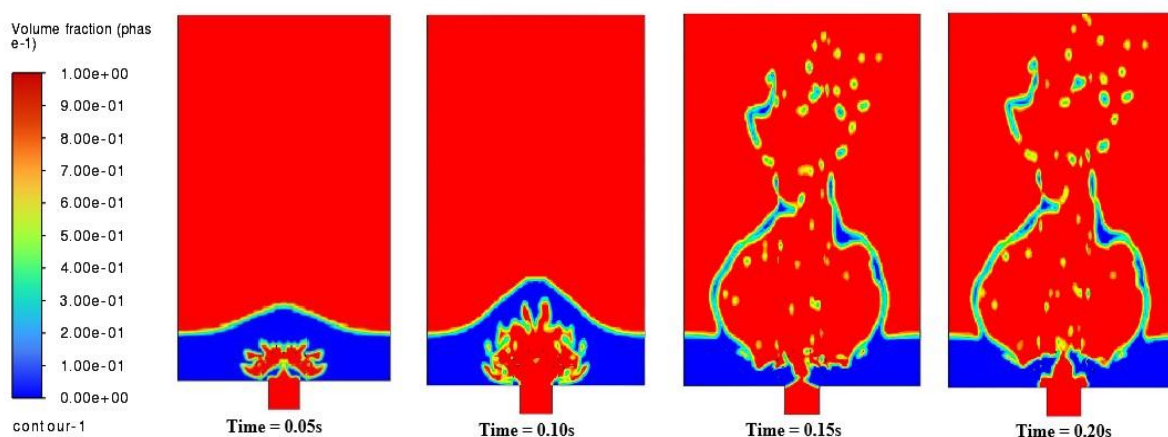


Рисунок 3.11 – Процесс движения газа в варианте 3

Схема, приведенная на рисунке 3.12, представляет результат применения перемешивающих лопастей для интенсификации дробления газовых пузырьков, как описано в разделе 3.1.3. Из-за наличия перемешивающих лопастей газ, поступающий в жидкость, при подъеме вверх вращается под действием перемешивающих лопастей, что способствует увеличению площади контакта газовой и жидкой фаз [125].

На Рисунок 3.13 представлены результаты изменения во времени площади контакта воздушного потока и жидкости. Видно, что площадь контакта между газом и жидкостью при использовании водяной ванны без дополнительных элементов составляет $0,25 \text{ м}^2$; при наличии одной сетки – $0,38 \text{ м}^2$; двухслойной сетки – $0,5 \text{ м}^2$; применение двух лопастей с сеткой между ними способствует увеличению площади до $1,85 \text{ м}^2$.

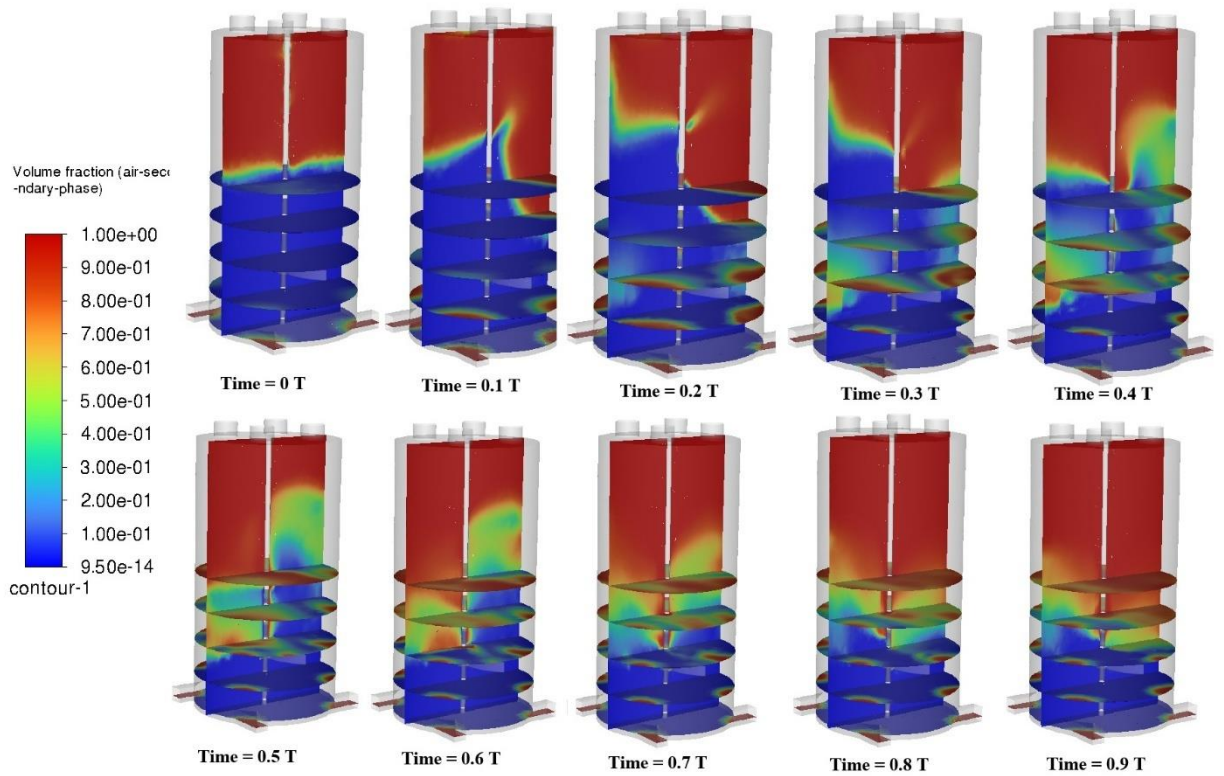


Рисунок 3.12 – Процесс движения газа в варианте 4

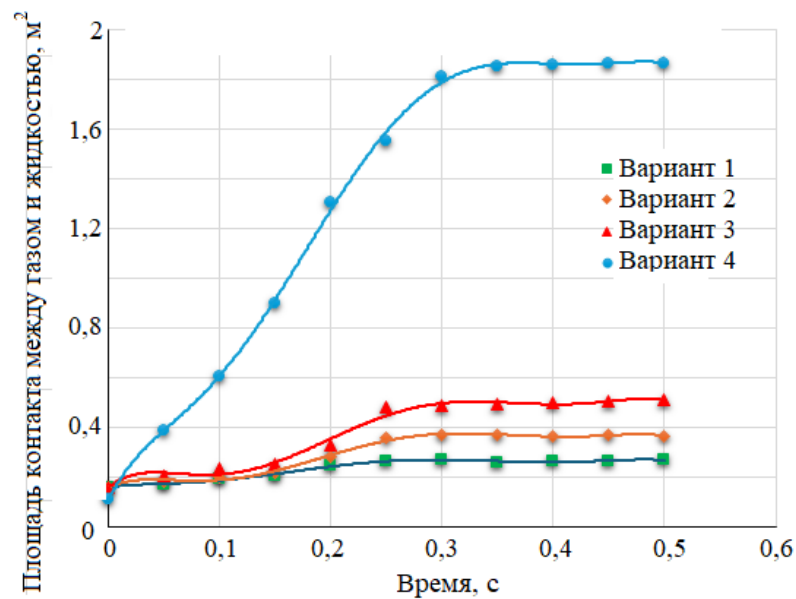


Рисунок 3.13 – Изменение площади контакта между газом и жидкостью во времени

Очевидно, что в варианте 4 при использовании перемешивающих лопастей площадь контакта двух фаз значительно больше, чем в трех других вариантах. При участии автора создана экспериментальная установка, описание и результаты

экспериментальных исследований подробно приведены в работе [126]. Имеют место результаты, идентичные численному эксперименту.

Для описания изменения площади газожидкостного контакта во времени была использована эмпирическая модель насыщенного роста:

$$S(t) = S_0 + (S_\infty - S_0) \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau} \right)^n \right) \right], \quad (3.10)$$

где $S(t)$ – площадь контакта газовой и жидкой фаз в момент времени t ;

S_0 – начальное значение площади контакта;

S_∞ – предельное, или установившееся, значение площади контакта;

τ – характерное время выхода процесса на установившийся режим;

n – эмпирический показатель формы кривой;

t – время, с.

Данная зависимость выбрана потому, что во всех рассматриваемых вариантах площадь газожидкостного контакта сначала быстро возрастает, а затем постепенно выходит на квазистационарный уровень.

Результаты аппроксимации следующие.

Вариант 1 – без аэратора:

$$S_1(t) = 0,16126 + 0,10613 \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{0,16886} \right)^{2,48318} \right) \right], \quad R^2 = 0,9864. \quad (3.11)$$

Вариант 2 – аэратор с одним слоем металлической сетки:

$$S_2(t) = 0,16126 + 0,20886 \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{0,20007} \right)^{3,37399} \right) \right], \quad R^2 = 0,9827. \quad (3.12)$$

Вариант 3 – аэратор с двумя слоями металлической сетки:

$$S_3(t) = 0,16126 + 0,34411 \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{0,20908} \right)^{3,06947} \right) \right], \quad R^2 = 0,9707. \quad (3.13)$$

Вариант 4 – устройство с лопастным перемешиванием:

$$S_3(t) = 0,11088 + 1,79309 \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{0,18831} \right)^{1,80649} \right) \right], R^2 = 0,9928. \quad (3.14)$$

В таблице 3.1 приведены сводные параметры аппроксимации изменения площади контакта между газом и жидкостью во времени для четырех вариантов конструкции водяной пылеуловительной установки.

Таблица 3.1 – Сводные параметры аппроксимации

Вариант	S_0	S_∞	τ, c	n	R^2
Без аэратора	0,16126	0,26739	0,16886	2,48318	0,9864
Один слой металлической сетки	0,16126	0,37012	0,20007	3,37399	0,9827
Два слоя металлической сетки	0,16126	0,50537	0,20908	3,06947	0,9707
Лопастное перемешивание	0,11088	1,90397	0,18831	1,80649	0,9928

Значения коэффициента детерминации R^2 для всех вариантов превышают 0,97, что свидетельствует о высокой степени согласования аппроксимирующих зависимостей с исходными расчётными данными.

Результаты аппроксимации показывают, что площадь газожидкостного контакта во всех вариантах имеет выраженный характер насыщенного роста. На начальном этапе происходит интенсивное увеличение площади контакта, связанное с формированием пузырьковой структуры и развитием межфазной поверхности. После этого процесс постепенно переходит в установившийся режим, при котором дальнейший рост площади контакта становится незначительным.

Минимальное установившееся значение площади контакта получено для варианта без аэратора $S_\infty = 0,26739$.

При использовании аэратора с одним слоем металлической сетки предельная площадь контакта увеличивается до $S_\infty = 0,37012$, что примерно на 38,4 % выше по сравнению с вариантом без аэратора.

Для аэратора с двумя слоями металлической сетки установившееся значение площади контакта составляет $S_\infty = 0,50537$. Это примерно на 89,0 % выше, чем в

варианте без аэратора. Следовательно, увеличение числа слоёв металлической сетки способствует более интенсивному диспергированию газовой фазы и увеличению площади межфазного контакта.

Наиболее высокий эффект получен при использовании устройства с лопастным перемешиванием. Для данного варианта предельная площадь контакта составляет $S_{\infty}=1,90397$. Это примерно в 7,12 раза выше, чем в варианте без аэратора. Такой результат объясняется тем, что лопастное перемешивание обеспечивает более интенсивное дробление газовых пузырьков, обновление межфазной поверхности и перераспределение газовой фазы в объёме жидкости.

Таким образом, по степени увеличения площади газожидкостного контакта рассматриваемые варианты располагаются в следующем порядке:

1. без аэратора;
2. один слой металлической сетки;
3. два слоя металлической сетки;
4. лопастное перемешивание.

Полученные зависимости подтверждают, что применение аэратора и особенно лопастного перемешивания является эффективным способом увеличения площади контакта между запылённым воздухом и водой. Это создаёт более благоприятные условия для улавливания мелкодисперсных частиц сварочного аэрозоля в водяной ванне.

3.2.2 Визуализация фазового распределения (газовая фаза)

С помощью численного моделирования был проведён сравнительный анализ площади контакта газожидкостной двухфазной среды в мокрых пылеулавливателях с аэратором и с перемешивающими лопастями, что послужило справочной основой для проектирования экспериментальной установки. Вместе с тем конструкция с перемешивающими лопастями обладает значительным потенциалом для дальнейшей оптимизации. С целью повышения

пылеулавливающей эффективности и снижения энергопотребления системы оптимизацию можно продолжить по следующим направлениям:

1. Форма лопастей существенно влияет на эффективность дробления пузырьков и на энергозатраты, поэтому целесообразно рассмотреть изменение конструкции лопастей.

2. Параллельно с изменением формы лопастей можно попробовать установить между верхним и нижним рядами лопастей металлическую сетку: вращающиеся тонкие металлические нити способны значительно усиливать дробление пузырьков (или капель).

3. Гидродинамические свойства жидкой рабочей среды оказывают сильное влияние на работу конструкции, поэтому допускается экспериментальная замена рабочей жидкости.

4. Основным рабочим узлом данной установки является пылеулавливающий резервуар; при наличии технической возможности следует рассмотреть возможность увеличения количества таких резервуаров.

3.3 Испытания базовой передвижной установки мокрого пылеулавливания (лопастное перемешивание)

3.3.1 Методика и стенд для испытаний

На Рисунок 3.14 и 3.15 приведена экспериментальная установка с новым типом передвижного устройства для мокрого обеспыливания.

На общем виде представлено передвижное устройство для улавливания взвешенных частиц: воздуходувка с двумя вентиляторами расходом воздуха 120 м³/ч и давлением 2800 Па, соединенных последовательно; система перемешивания для создания скорости вращения от 0 до 300 об/мин, которая включает двигатель с цифровым дисплеем мощностью 300 Вт.

В качестве сварочного аппарата используется сварочный аппарат с защитой от углекислого газа (Рисунок 3.14 в), производитель – компания Delisi, которая

является самым известным производителем сварочных аппаратов в Китае, а в качестве сварочного электрода используется сварочный электрод типа J422, который является наиболее распространенным сварочным электродом на китайском рынке.

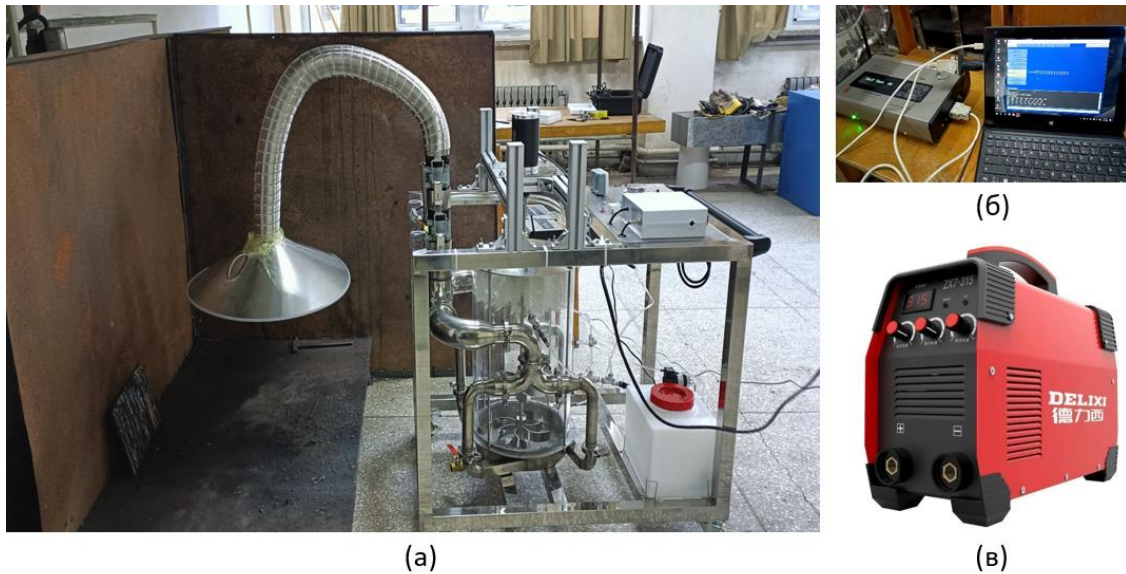


Рисунок 3.14 – Общий вид экспериментальной установки
 а – передвижное устройство; б – портативный лазерный пылемер GRIMM 11-D; в – сварочный аппарат

Рабочий процесс улавливания сварочной пыли заключается в следующем: дымовые газы, образующиеся при сварке, улавливаются пылеприемником 1 за счет воздуходувки 3. Через гофрированную соединительную трубу 2, соединитель 5 и входную трубу 8 вредности попадают в цилиндр пылесборника 7, в нижней части которого находится вода. Частицы дымовых газов адсорбируют жидкость. Для повышения эффективности очистки в цилиндре пылесборника установлена мешалка с лопатками, которые приводятся в движение с помощью электродвигателя 6 с регулятором скорости 4. Благодаря вращению лопаток капли жидкости измельчаются, что способствует увеличению площади контакта пыль-газ-жидкость и, следовательно, повышению эффективности очистки.

Поскольку образцы сварочного дыма невозможно сохранить или гомогенизировать, эксперимент был выбран для проведения в сварочном цехе, а

сварочный аппарат обслуживался сварщиком с большим опытом работы для поддержания стабильности сварного шва, а двери и окна во время эксперимента держали закрытыми, чтобы избежать влияния внешнего потока воздуха на сварной шов (рисунок 3.16).

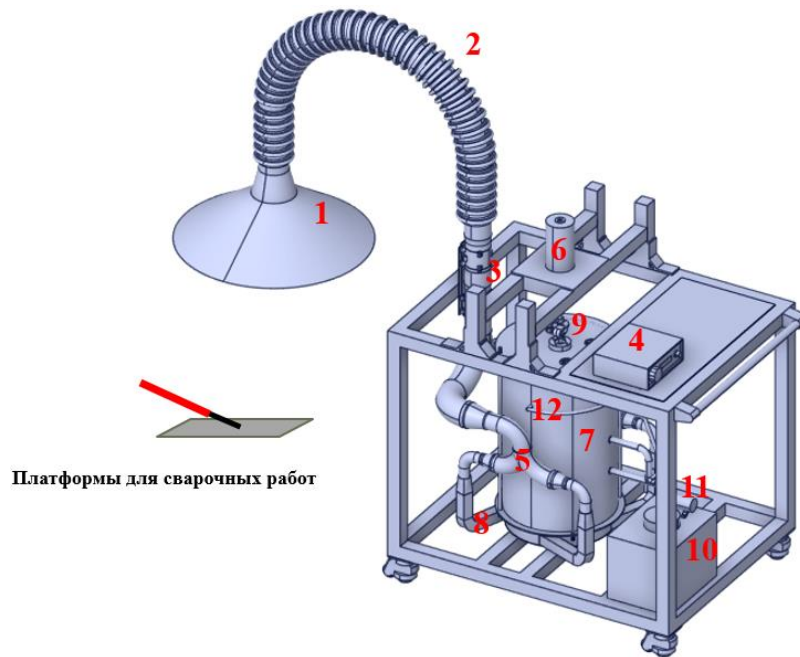


Рисунок 3.15 – Принципиальная схема экспериментального оборудования с водяной баней и системой перемешивания

1 – пылеприемник; 2 – гофрированная соединительная труба; 3 – воздуходувка; 4 – регулятор скорости; 5 – перераспределитель потоков; 6 – электродвигатель мешалки; 7 – цилиндр пылесборника; 8 – входная труба; 9 – выходное отверстие; 10 – водяной бак; 11 – насосы; 12 – распылительный трубопровод

Для определения размера частиц аэрозоля используется портативный лазерный пылемер GRIMM 11-D производства компании GRIMM, Германия (Рисунок 3.14 б). Спектрометр размера частиц является современным оборудованием компании, что обеспечивает достоверность данных; в то же время программное обеспечение и компьютер для сбора данных являются официальным сопутствующим программным обеспечением и компьютером прибора.

Экспериментально измеряется положение пылеприемника в сварочном процессе (высота 0,400 м над точкой сварки) при концентрации твердых частиц в

качестве пылеудаления C_1 . При фиксированном положении пылеприемника над точкой сварки проведены экспериментальные измерения концентрации твердых частиц C_2 на выходе из цилиндра пылесборника при уровнях жидкости в цилиндре 5 см, 10 см, 15 см, 20 см и скоростях вращения лопастей 0 об/мин, 50 об/мин, 100 об/мин, 150 об/мин, 200 об/мин. Все измерения проводились при отключенной системе распыления.



Рисунок 3.16 – Процедура проведения эксперимента

Распределение частиц по размерам имеет две формы: интервальное (частотное) распределение и кумулятивное распределение [157]. В данном исследовании используется частотное распределение, которое позволяет выявить процентное содержание частиц в каждом интервале размеров.

Эффективность пылеудаления η сварочного пылеуловителя обычно рассчитывается [158]:

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1}. \quad (3.15)$$

3.3.2 Программа и планирование эксперимента

Перед началом эксперимента все измерительные приборы, используемые в ходе испытаний, были откалиброваны. Затем к работе приступил опытный сварщик, который выполнял сварку максимально непрерывно и стабильно: продолжительность сварки одним электродом составляла 52 с, а замена электрода осуществлялась не более чем за 4 с, что обеспечивало непрерывное и стабильное образование сварочного дыма.

Концентрация частиц измерялась на выходе из перемешивающего пылеулавливающего резервуара, на основе чего рассчитывалась начальная эффективность пылеулавливания η_1 .

Далее включали приводной двигатель мешалки и заливали в резервуар воду до различных уровней, после чего определяли эффективность удаления частиц различного размера η_2 при разных высотах слоя жидкости. В ходе эксперимента при каждом фиксированном уровне жидкости (5 см, 10 см, 15 см, 20 см) последовательно изменяли частоту вращения двигателя и измеряли эффективность пылеулавливания η_2 для частиц различных размеров при частотах вращения 50, 100, 150 и 200 об/мин.

В данном эксперименте давление вентилятора не подлежало регулированию, поэтому расход воздуха поддерживался постоянным и составлял 0,126 кг/с.

Параметры эксперимента: частота вращения мешалки: 0, 50, 100, 150 и 200 об/мин; высота уровня жидкости: 5 см, 10 см, 15 см и 20 см.

Система орошения в течение всего эксперимента оставалась выключенной, что позволяло отдельно оценить эффективность мокрого пылеулавливателя.

3.3.3 Анализ экспериментальных данных

На рисунке 3.17 показаны зависимости эффективности пылеудаления η от частоты вращения мешалки n и размера частиц при различной высоте уровня жидкости h в резервуаре. На рисунке 3.18 представлены зависимости

эффективности пылеудаления η от высоты уровня жидкости h в резервуаре и размера частиц при различных частотах вращения мешалки n . [126].

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунках 3.17–3.18, позволяет выявить сложную взаимосвязь между частотой вращения, высотой уровня жидкости и дисперсностью (размером частиц) пыли. Подробный анализ и интерпретация результатов приведены ниже.

1. Влияние частоты вращения мешалки на эффективность захвата

Экспериментальные результаты показывают, что эффективность очистки демонстрирует выраженную тенденцию к росту с увеличением частоты вращения.

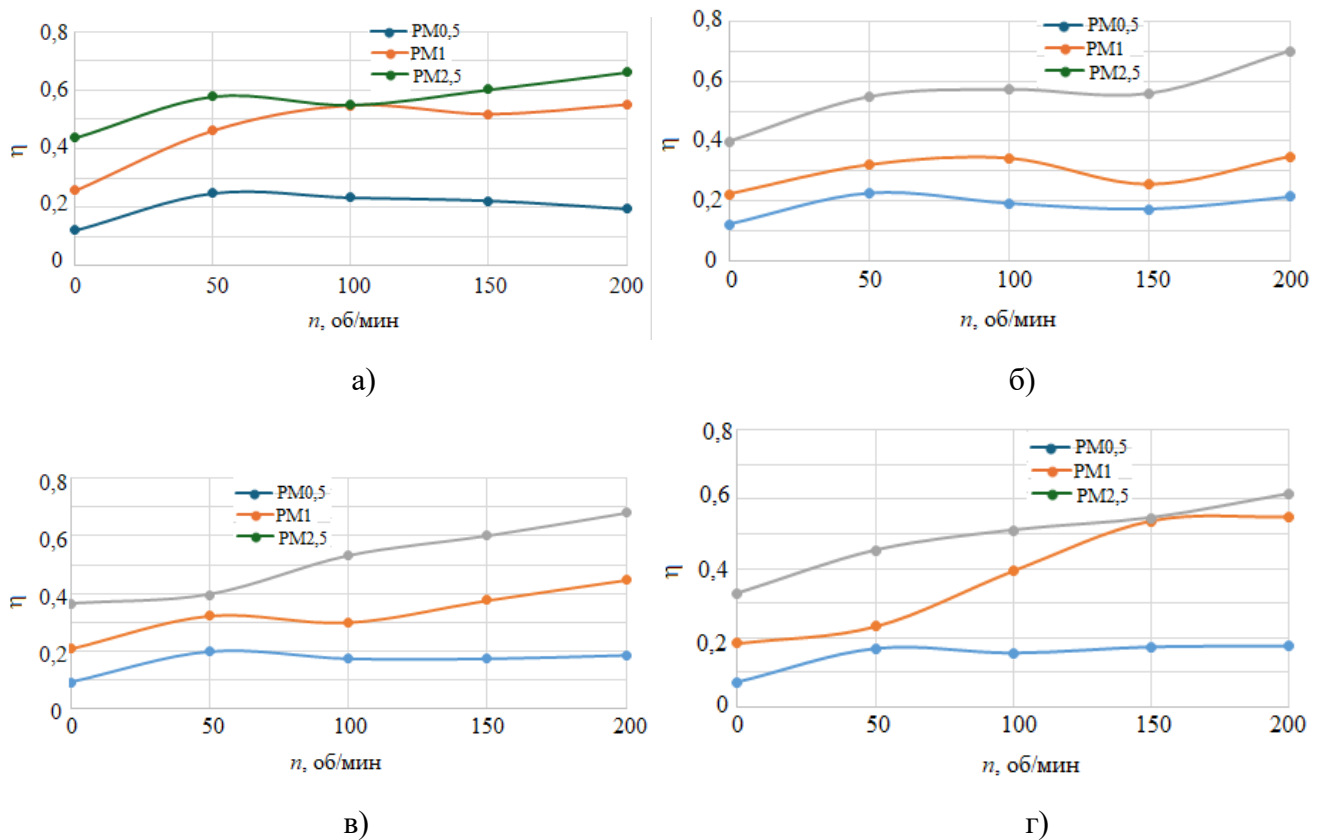


Рисунок 3.17 – Зависимости эффективности пылеудаления η от частоты вращения мешалки n и размера частиц при различной высоте h уровня жидкости в резервуаре

а – $h = 5$ см; б – $h = 10$ см; в – $h = 15$ см; г – $h = 20$ см

- Механизм: При повышении частоты вращения с 0 до 200 об/мин усиливается сдвиговое воздействие мешалки на жидкую фазу, что способствует возникновению интенсивной турбулентности и активному дроблению пузырьков воздуха. Это не

только увеличивает эффективную площадь межфазного контакта «газ–жидкость», но и сокращает диффузионный путь частиц пыли к поверхности раздела фаз.

- Инерционное столкновение: Для частиц более крупного размера (например, 2,5 мкм) увеличение частоты вращения напрямую повышает их тангенциальную скорость и инерционную центробежную силу. Это позволяет частицам легче преодолевать линии тока воздушного потока и захватываться жидкой фазой за счет механизма инерционного столкновения.

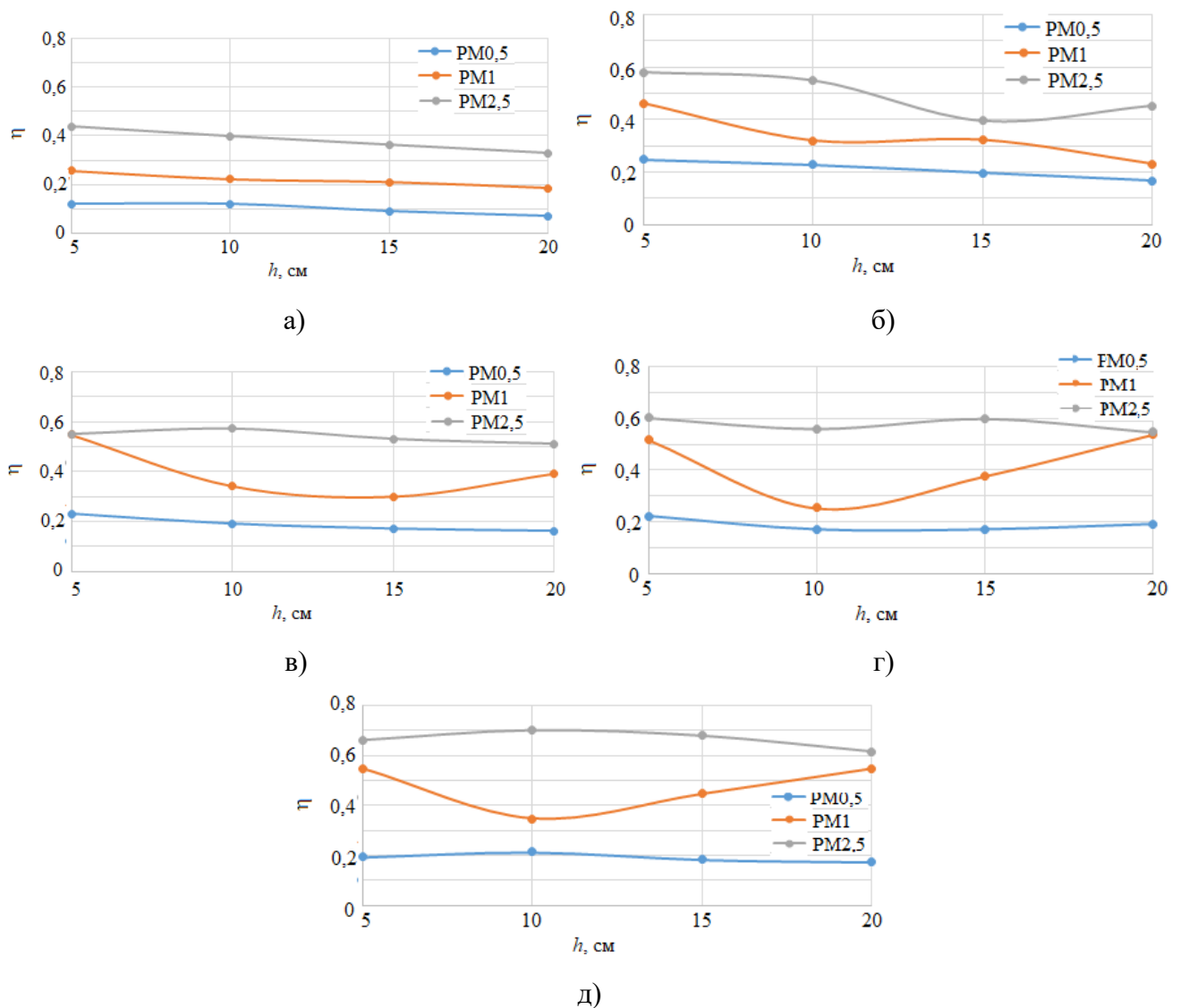


Рисунок 3.18 – зависимости эффективности пылеудаления η от высоты уровня жидкости h в резервуаре и размера частиц при различных частотах вращения мешалки n .

а – $n = 0$; б – $n = 50$ об/мин; в – $n = 100$ об/мин; г – $n = 150$ об/мин; д – $n = 200$ об/мин

2. Влияние уровня жидкости на эффективность захвата

При высоте уровня жидкости 15 см система демонстрирует оптимальную эффективность пылеулавливания (для частиц 2,5 мкм показатель достигает 68,1%). Однако, как дальнейшее повышение уровня (до 20 см), так и его снижение ведут к падению эффективности.

Данный феномен обусловлен совокупным влиянием времени контакта газа с жидкостью и статического давления. Уровень 15 см является «оптимальным рабочим режимом» для исследуемой установки. При низком уровне (5–10 см) путь прохождения газа через жидкость слишком короток, что приводит к недостаточному времени контакта и неполному захвату частиц. При чрезмерно высоком уровне жидкости возрастает статическое давление, что замедляет скорость дробления пузырьков. Кроме того, высокий уровень увеличивает сопротивление перемешиванию, что может приводить к возникновению локальных «проскоков» воздуха или образованию «мертвых зон» в цилиндре, снижая общую эффективность.

3. Изменение механизмов захвата в зависимости от размера частиц

Система показывает высокую эффективность при улавливании частиц размером 2,5 мкм, в то время как для частиц 0,5 мкм эффективность захвата повсеместно составляет менее 20%.

Основная причина заключается в том, что поведение крупных частиц (1–2,5 мкм) определяется преимущественно механизмом инерционного столкновения, где прирост кинетической энергии от частоты вращения мешалки играет решающую роль. Напротив, частицы субмикронного размера (0,5 мкм) обладают ничтожно малой массой и слабой инерцией, вследствие чего они практически полностью следуют линиям тока воздушного потока. В этом случае традиционные механизмы физического перехвата и столкновения становятся малоэффективными, а захват осуществляется за счет крайне слабого механизма броуновской диффузии. Этим объясняется низкая эффективность очистки для мелкодисперсных фракций (0,5 мкм).

В целях дальнейшего количественного описания закономерностей влияния переменных на эффективность очистки, в данной работе проведена нелинейная

аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов. На основе регрессионного анализа определена зависимость эффективности пылеудаления от диаметра частиц, высоты уровня жидкости и частоты вращения мешалки. Данная зависимость описывается уравнением:

$$\eta = k \cdot \frac{d_p^{0,33} \cdot n^{0,10}}{h^{0,17}}, \quad (3.16)$$

где η – эффективности пылеулавливания;

k – поправочный коэффициент;

d_p – диаметр частиц, мкм

h – высота уровня жидкости, см;

n – частоты вращения мешалки, об/мин.

Полученная зависимость не только подтверждает выявленные в ходе экспериментов тенденции, но и служит теоретическим обоснованием для последующей оптимизации конструкции установки и прогнозирования её рабочих характеристик.

3.4 Экспериментальное исследование новой передвижной установки комбинированного водяного пылеулавливания с мешалкой и орошением

3.4.1 Методика и стенд для испытаний

Как отмечено выше, мелкие капли тумана, уносимые с выхлопным потоком из водоочистного пылеулавливающего аппарата, оказывают значительное влияние на точность измерений концентрации твёрдых частиц. Эта проблема является типичной для исследований мокрой очистки газов. В инженерной практике для её решения часто применяют метод взвешивания фильтров: после отбора пробы фильтр высушивают и взвешивают, а эффективность улавливания частиц рассчитывают по изменению массы. Однако, такой подход определяет эффективность на основе массовой концентрации, что приводит к преувеличенной

значимости крупных частиц в пылегазовом потоке и не позволяет корректно оценить эффективность удаления мелкодисперсных частиц.

Для устранения указанного недостатка в установке дополнительно установлен нагреватель на выходе из экспериментальной установки. Нагрев способствует испарению мелких капель воды, тем самым снижая их вклад в измеряемую концентрацию частиц.

В исследованиях очистки сварочного аэрозоля поведение сварщика существенно влияет на достоверность экспериментальных результатов. При ручной сварке такие параметры, как положение тела оператора, скорость перемещения горелки, стабильность дуги и угол наклона электрода, подвержены значительным индивидуальным различиям и случайным колебаниям. Это вызывает нестабильность в скорости образования аэрозоля, распределении частиц по размерам и их концентрации, что затрудняет объективную оценку эффективности пылеулавливающего оборудования.

Для минимизации влияния этих факторов и повышения воспроизводимости и надёжности данных могут быть применены следующие подходы.

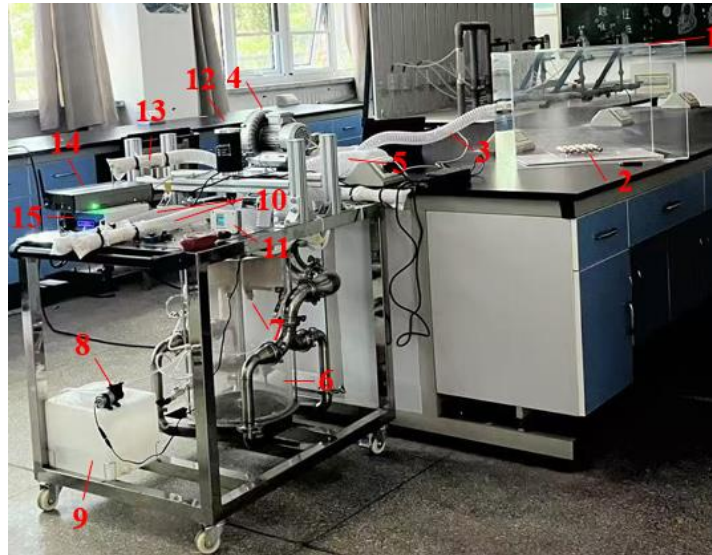
1) Использование сварочного робота для выполнения полностью стандартизированной операции, что обеспечивает постоянство сварочных параметров (тока, напряжения, скорости перемещения и др.) и стабильность процесса генерации аэрозоля.

2) Замена реального сварочного аэрозоля стандартной пылью Arizona Test Dust, имеющей чётко определённый гранулометрический состав и химическую однородность, что упрощает сравнительный анализ эффективности очистки.

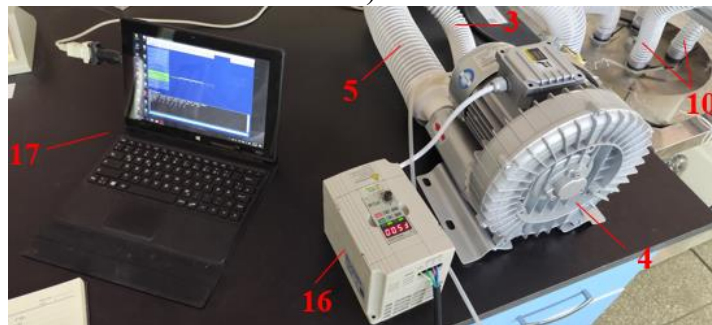
3) В отдельных модельных экспериментах допустимо применение аэрозоля, образующегося при сжигании агарвуда (благонного дерева), — источника с относительно стабильными аэрозольными характеристиками и простым способом генерации. Однако следует учитывать, что химический состав такого аэрозоля значительно отличается от сварочного, поэтому его использование ограничено исследованиями физических (не химических) механизмов очистки.

Таким образом, сочетание автоматизированных сварочных систем и стандартизированных источников частиц позволяет значительно повысить научную строгость и сопоставимость результатов в исследованиях очистки сварочного аэрозоля.

На рисунке 3.19 представлена модернизированная установка, описанная в п. 3.3.1.



а)



б)

Рисунок 3.19 – Схема экспериментальной установки для исследования эффективности пылеулавливания с использованием водяной ванны и орошения

1 – зонд отбора дымовых газов (колпак для сбора дыма); 2 – агарвуд; 3 – входной патрубок вентилятора; 4 – центробежный вентилятор (нагнетатель); 5 – выходной патрубок вентилятора; 6 – пылеуловительный бак (сепаратор); 7 – форсунка орошения; 8 – насос системы орошения; 9 – резервуар для оросительной воды; 10 – выпускной патрубок пылеуловительного бака; 11 – индикатор частоты вращения; 12 – приводной двигатель мешалки; 13 – нагревательный участок выпускного патрубка пылеуловительного бака; 14 – генератор аэрозольных частиц заданного размера; 15 – контроллер двигателя мешалки; 16 – частотный преобразователь вентилятора (регулятор скорости вентилятора); 17 – терминал, сопряжённый со спектрометром размеров аэрозольных частиц

В данном эксперименте система орошения состоит из следующих компонентов: 7 – форсунка орошения; 8 – насос системы орошения; 9 – резервуар для оросительной воды. Высота расположения форсунок 7 составляет 0,45 м от дна пылеуловительного бака. Установлено два форсунки – слева и справа. Каждая форсунка оснащена тремя отверстиями диаметром 1 мм. Тип распыления – полый конус (форсунки с распылением в виде полого конуса).

3.4.2 Программа и планирование эксперимента

Перед началом эксперимента были проведены калибровка всех измерительных приборов, используемых в установке. Затем поджигали агарвуд, устанавливая его строго в центре зонда отбора дымовых газов 1 (колпака для сбора дыма). Агарвуд поджигали одновременно с обеих сторон, чтобы исключить влияние его положения на состав и распределение дыма, всасываемого центробежным вентилятором.

На выходе из нагревательного участка выпускного патрубка пылеуловительного бака 13 измеряли концентрацию частиц и использовали полученное значение для расчёта исходной эффективности очистки η_1 .

После этого включали систему орошения и приводной двигатель мешалки и проводили измерения эффективности очистки η_2 при различных режимах работы.

В данном эксперименте давление насоса системы орошения 8 не регулировалось, поэтому массовый расход оросительной воды оставался постоянным и составлял 0,126 кг/с.

Исследования проводились при следующих параметрах:

- частота вращения мешалки: 0, 50, 100, 150 и 200 об/мин;
- скорость воздушного потока на выходе вентилятора: 5, 10, 15 и 20 м/с.

Поскольку дренажное отверстие пылеуловительного бака расположено на высоте 0,05 м, то в ходе эксперимента на дне бака постоянно поддерживается уровень воды высотой 0,05 м. Таким образом, данный эксперимент представляет собой исследование комплексной эффективности пылеулавливания, сочетающего

использование водяной ванны и системы орошения. Всего было выполнено 20 экспериментальных серий. На рисунке 3.20 представлены зависимости эффективности пылеудаления η от частоты вращения мешалки n и скорости потока воздуха v для частиц различных размеров при выключенной (рисунок 3.20 а, в, д) и включенной системе орошения (рисунок 3.20 б, г, е).

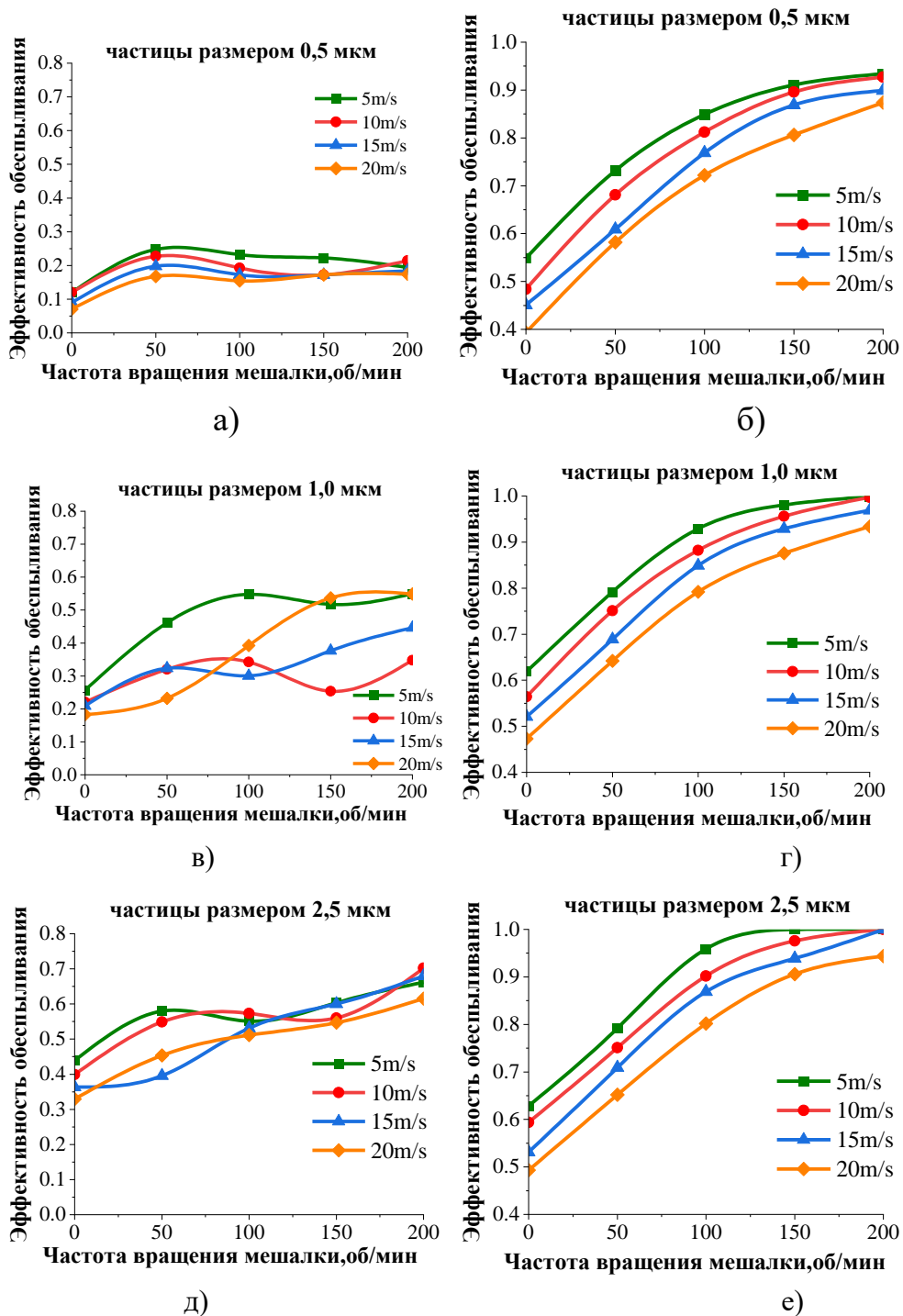


Рисунок 3.20 – Зависимости эффективности пылеулавливания от частоты вращения мешалки и скорости потока воздуха при выключенной и включенной системе орошения

3.4.3 Анализ экспериментальных данных

На основе реализованной программы эксперимента получены данные о влиянии ключевых эксплуатационных параметров – частоты вращения мешалки и скорости воздушного потока – на общую эффективность пылеулавливания. Представлен сравнительный анализ эффективности очистки в условиях совместного действия водяной ванны и системы орошения. Для обеспечения точности выводов все измерения были сопоставлены с исходной эффективностью очистки частиц η_1 , что позволило выявить закономерности изменения показателя η_2 при различных режимах работы установки.

Результаты показали, что эффективность очистки для частиц всех размеров повышается с увеличением частоты вращения мешалки. При этом установка демонстрирует крайне высокую степень улавливания пыли фракции 1 мкм, которая в определенных режимах работы приближается к 100 %.

Согласно полученным данным, эффективность пылеулавливания стабильно возрастает по мере повышения частоты вращения. Основной причиной данного явления выступает то, что увеличение частоты вращения интенсифицирует закрученный поток внутри корпуса очистителя, заставляя капли тумана совершать спиральное движение вниз. Это, в свою очередь, повышает вероятность столкновения капель с частицами пыли и их последующего захвата. Одновременно с этим волокнистые демистеры, установленные в корпусе, также повышают свою эффективность перехвата частиц при увеличении частоты вращения. Кроме того, наблюдается отчетливое снижение эффективности очистки с ростом скорости воздушного потока. Это объясняется тем, что при увеличении скорости потока сокращается время пребывания аэрозоля внутри очистной установки, что ведет к снижению степени обеспыливания.

В целях дальнейшего количественного описания закономерностей влияния различных переменных на эффективность очистки, в данной работе была проведена нелинейная аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов. На основе регрессионного анализа определена зависимость

эффективности пылеудаления от диаметра частиц, высоты уровня жидкости и частоты вращения мешалки без орошения. Данная зависимость описывается уравнением:

$$\eta = 1 - \exp \left\{ -0,642 \cdot \frac{d_p^{0,77}}{v^{0,20}} \cdot \left(\frac{n + 18,7}{100} \right)^{0,32} \right\}, \quad (3.17)$$

где η – эффективности пылеулавливания;

d_p – диаметр частиц, мкм;

v – скорости потока воздуха, м/с;

n – частоты вращения мешалки, об/мин.

Включение системы орошения дополнительно повышает эффективность пылеулавливания, особенно для мелкодисперсных частиц. Для количественного описания полученных закономерностей выполнена нелинейная аппроксимация экспериментальных данных и получена зависимость эффективности пылеудаления от скорости воздушного потока, частоты вращения мешалки и диаметра частиц:

$$\eta = 1 - \exp \left(-0,780 \cdot \frac{d_p^{0,176}}{v^{0,316}} \cdot \left(\frac{n + 147}{100} \right)^{1,77} \right). \quad (3.18)$$

Полученная модель не только подтверждает выявленные в ходе экспериментов тенденции, но и служит теоретическим обоснованием для последующего усовершенствования конструкции установки и прогнозирования её рабочих характеристик.

3.5 Выводы

В данной главе на основе фундаментальных принципов мокрой очистки газов и конструкции традиционных мобильных установок местной вытяжной вентиляции разработано переносное устройство мокрого пылеулавливания с перемешивающим механизмом. С помощью метода численного моделирования определены основные конструктивные параметры устройства, в соответствии с которыми изготовлен экспериментальный прототип. Проведены испытания эффективности пылеулавливания в режиме водяной ванны в реальных условиях

сварки, а также комплексной эффективности очистки (водяная ванна с орошением) при улавливании частиц дыма агарвуда. Результаты исследования показали, что данное устройство обладает высокой эффективностью удаления мелкодисперсных частиц, типичным примером которых являются сварочные аэрозоли. В определенных рабочих режимах комплексная эффективность системы «водяная ванна с орошением» приближается к 100 %.

4 Исследование воздушного режима с предлагаемыми усовершенствованиями вентиляции сварочного цеха

4.1 Численная модель воздушного режима

Как указано в п. 3.4.3, хотя эффективность очистки локального пылеулавливающего устройства может приближаться к 100 %, но данный показатель отражает лишь степень очистки тех частиц, которые уже попали внутрь устройства. В реальных инженерных условиях, однако, необходимо учитывать эффективность захвата пылеулавливателем – то есть долю частиц, действительно попадающих в устройство. Особенно в крупных цехах, оборудованных общеобменной вентиляцией, именно эффективность захвата или улавливания оказывает более существенное влияние на общий очистной эффект.

Под эффективностью улавливания вентиляционной системы понимают долю загрязнений, мгновенно улавливаемую непосредственно у источника, – показатель «ближнего контроля» выброса. Эффективность же очистки отражает, на сколько процентов снижается концентрация загрязнений при прохождении воздушного потока через фильтрующее или очистное устройство, и характеризует способность «концевого» удаления. Эти понятия различны, но тесно взаимосвязаны: при низкой эффективности улавливания загрязняющие вещества распространяются по всему помещению, и даже очень высокая эффективность очистки уже не позволяет избежать превышения общей концентрации загрязнений в помещении.

Поэтому необходимы систематические исследования эффективности улавливания вентиляционных систем с целью выявления влияния ключевых параметров – таких как скорость подачи воздуха, тип воздухораспределителей, характеристики источника загрязнения – и создания научной основы для точного удаления загрязнений, энергоэффективной эксплуатации систем и оценки профессиональных рисков.

4.1.1 Структура комбинированной вентиляционной системы

Смешанная система вентиляции представляет собой комплексную стратегию, объединяющую общеобменную вентиляцию (общую подачу и удаление воздуха) с местной вентиляцией (установкой пылеулавливающих устройств непосредственно у источника загрязнения). Данная система поддерживает общее качество воздуха, температуру и влажность в помещении за счёт общеобменной вентиляции, одновременно обеспечивая эффективный захват загрязняющих веществ у самого источника их образования с помощью местных вытяжных устройств, предотвращая их распространение в рабочую зону. Такой комбинированный подход позволяет не только повысить эффективность контроля за загрязнениями, но и снизить общее энергопотребление системы, что особенно выгодно в промышленных условиях с высоким уровнем загрязнения, таких как сварка, шлифовка, химическое производство и др.

Конструкция такой системы относительно сложна и зависит от множества факторов, главными из которых являются скорость и направление приточного воздуха, а также расположение местных пылеулавливающих устройств. В контексте пылеулавливания ключевой проблемой является то, что приток воздуха от общеобменной вентиляции влияет на эффективность захвата твёрдых частиц местным пылеулавливающим устройством.

Как показано на рисунке 4.1, сварочный аэрозоль под действием силы плавучести и всасывания местного отсоса движется вверх, однако в процессе его движение подвергается возмущениям, вызванным приточным потоком общеобменной вентиляции. Это приводит к снижению эффективности всасывания частиц в пылеулавливающее устройство, то есть уменьшает эффективность захвата. Основные факторы, влияющие на эффективность захвата, включают:

- взаимное расположение пылеулавливающего устройства и приточного воздухораспределителя;
- конструкцию и скорость всасывания устья местного отсоса;
- высоту расположения местного отсоса относительно сварочной точки.

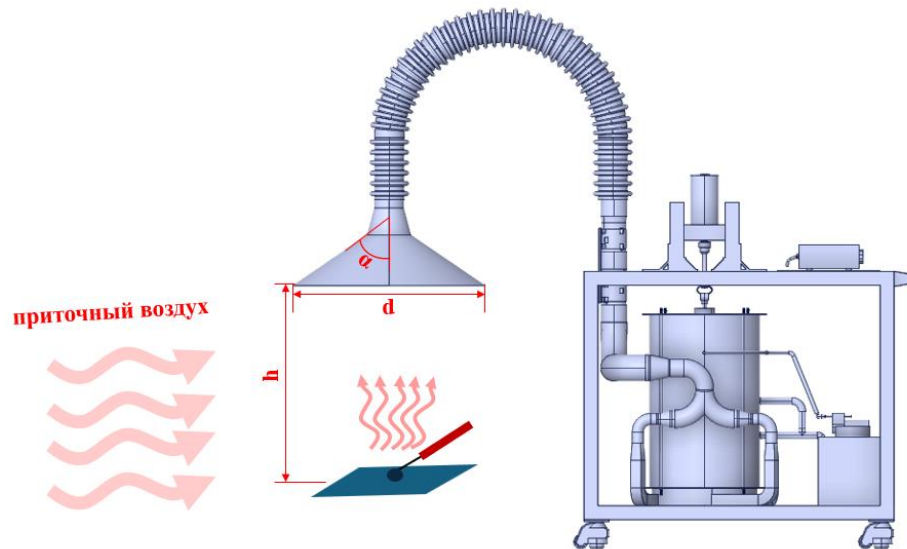


Рисунок 4.1 – Схема процесса улавливания твёрдых частиц пылеулавливающим устройством

Конструкция местного отсоса определяется диаметром устья d и углом раскрытия зонта α .

В настоящем исследовании рассматривается сварочный цех, в котором места сварки являются непостоянными в зависимости от технологического процесса. Однако относительное положение сварочной точки и приточного воздухораспределителя оказывает существенное влияние на эффективность захвата пылеулавливающего устройства. Поэтому, с учётом конструктивных особенностей данного сварочного цеха, в качестве объектов исследования были выбраны шесть репрезентативных точек сварки, как показано на рисунке 4.2.

Конструкция цеха обладает чёткой регулярностью: по ширине он состоит из трёх структурных модулей шириной по 22 м каждый, а по длине также наблюдается ярко выраженная повторяющаяся структура. При этом каждый пролёт длиной 21 м может быть разделён на две симметричные половины. В рамках исследования были выбраны следующие точки в пределах одной половины пролёта: четыре угла (точки А, Б, В, Г), центральная точка (Д) и точка, расположенная ближе всего к зоне сварки непосредственно напротив приточного воздухораспределителя (Е). Среди этих шести точек определялась точка с минимальной эффективностью захвата, которая и принималась в качестве основного объекта исследования (рисунок 4.3).

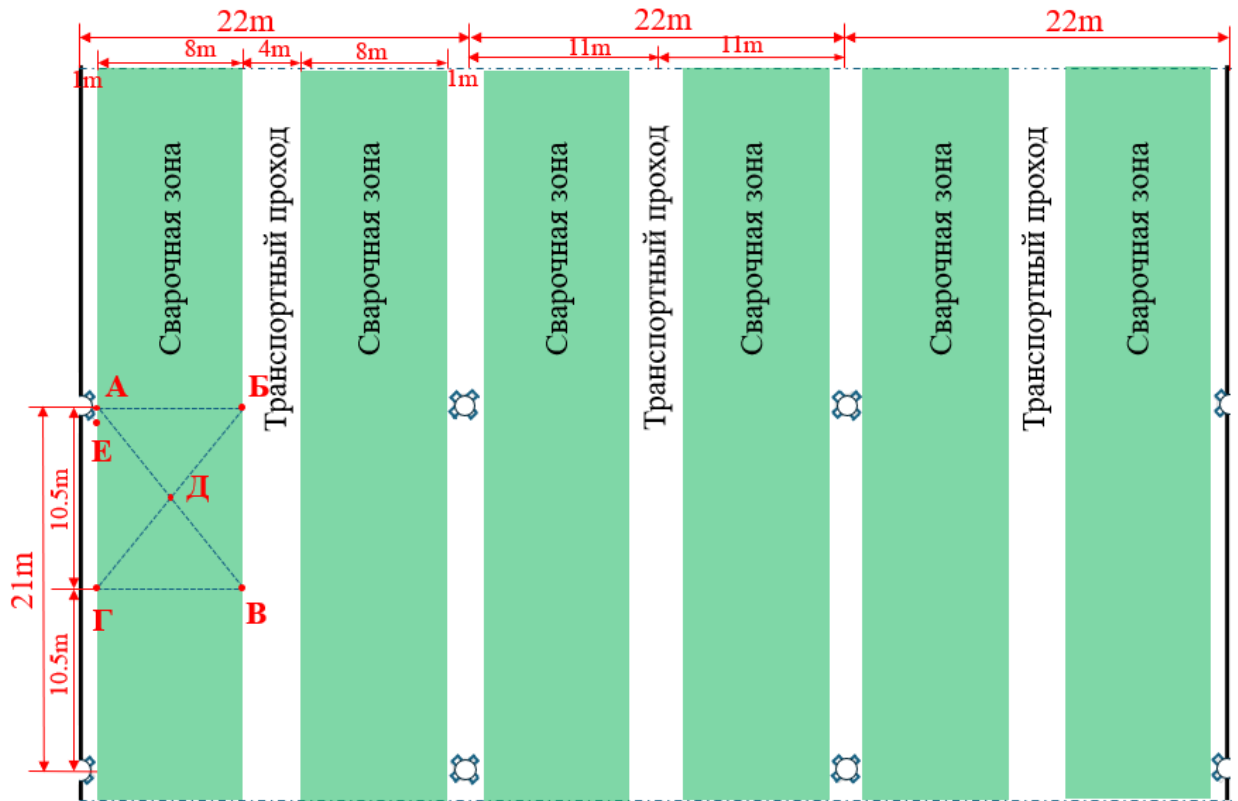


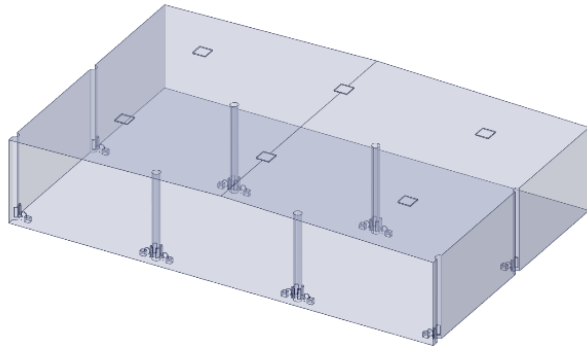
Рисунок 4.2 – Схематическое изображение структуры функциональных зон сварочного цеха

4.1.2 Численная модель комбинированной вентиляционной системы

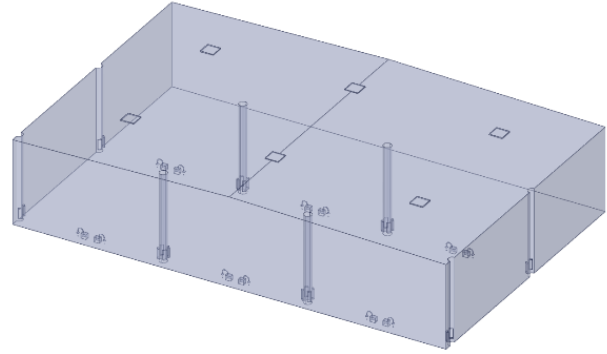
Для моделирования процесса распространения сварочного аэрозоля в цехе использовалась модель DPM (Discrete Phase Model). Система вентиляции оставалась в конфигурации «подача снизу – удаление сверху». В качестве приточных воздухораспределителей применялись устройства с поворотными лопатками, обеспечивающими регулировку направления потока. Приточные воздуховоды рассмотрены как установленные на колонны. При этом в рамках данного исследования модель не упрощалась за счёт исключения участков воздуховодов – воздухораспределители смонтированы непосредственно на колоннах, как показано на рисунке 4.4. Источник сварки (сварочная точка) по-прежнему моделировался как вход с заданной скоростью. Упрощённая схема пылеулавливающего устройства и зонта местного отсоса представлена на рисунке 4.4.

Основное внимание в данном исследовании уделялось эффективности захвата пылеулавливающего устройства в условиях работы общеобменной

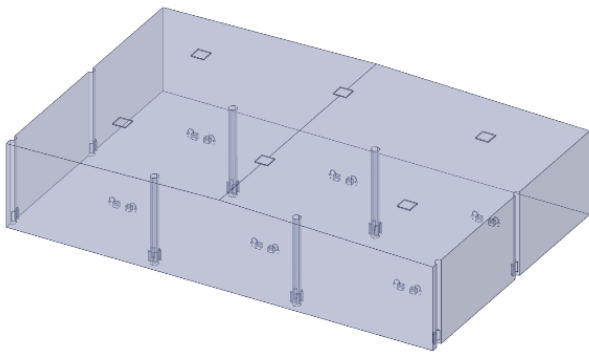
вентиляции. В связи с этим эффективность очистки принималась равной 100 % для упрощения расчётной модели. Соответственно, нижняя поверхность зонта местного отсоса задана как выходная граница, а остальные поверхности корпуса пылеуловителя – как стенки расчётной области.



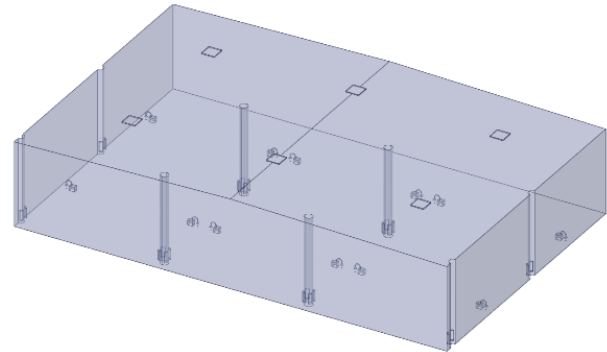
а) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка А.



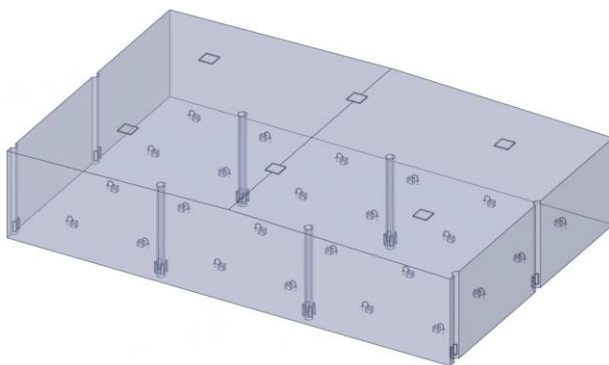
б) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка Б



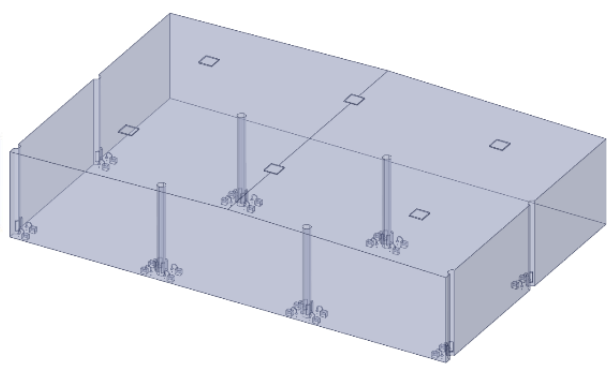
в) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка В.



г) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка Г



д) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка Д



е) Случайное расположение источника сварочного аэрозоля: точка Е

Рисунок 4.3 – Схематические модели при шести вариантах расположения сварочного поста

Построены модели и произведено построение сетки для шести вышеуказанных характерных положений сварочной точки. Размеры ячеек сетки

унифицированы по всему расчёту, при этом предусмотрено локальное измельчение сетки в ключевых зонах:

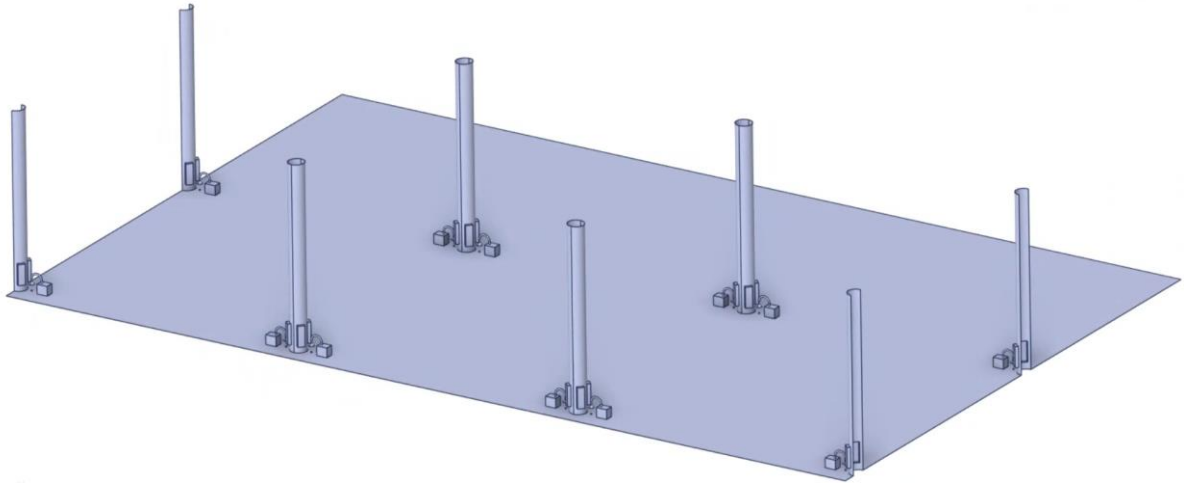


Рисунок 4.4 – Укрупнённый фрагмент модели для точки А

- в области сварочной точки – 5 мм,
- на нижней поверхности зонга местного отсоса – 10 мм,
- на поверхностях приточных воздухораспределителей – 20 мм,
- на остальных поверхностях пылеуловителя – 40 мм,
- на прочих поверхностях расчётной области – 80 мм,
- максимальный размер ячейки на поверхности – 160 мм,
- коэффициент роста размера ячеек – 1,4.

Общее количество ячеек сетки составило приблизительно 6 миллионов. На рисунке 4.5 представлены фрагменты расчётной сетки.

Конструкция пылеприёмника должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- диаметр нижней всасывающей поверхности следует по возможности уменьшать, поскольку её чрезмерное увеличение будет мешать проведению сварочных работ;
- необходимо обеспечивать оптимальную высоту расположения пылеприёмника: слишком малая высота будет затруднять работу сварщика;

– скорость воздушного потока в зоне сварки должна быть менее 1,2 м/с. Превышение этого значения возможно, как при чрезмерно низком расположении зонта местного отсоса, так и при слишком высокой скорости всасывания в самом зонте.

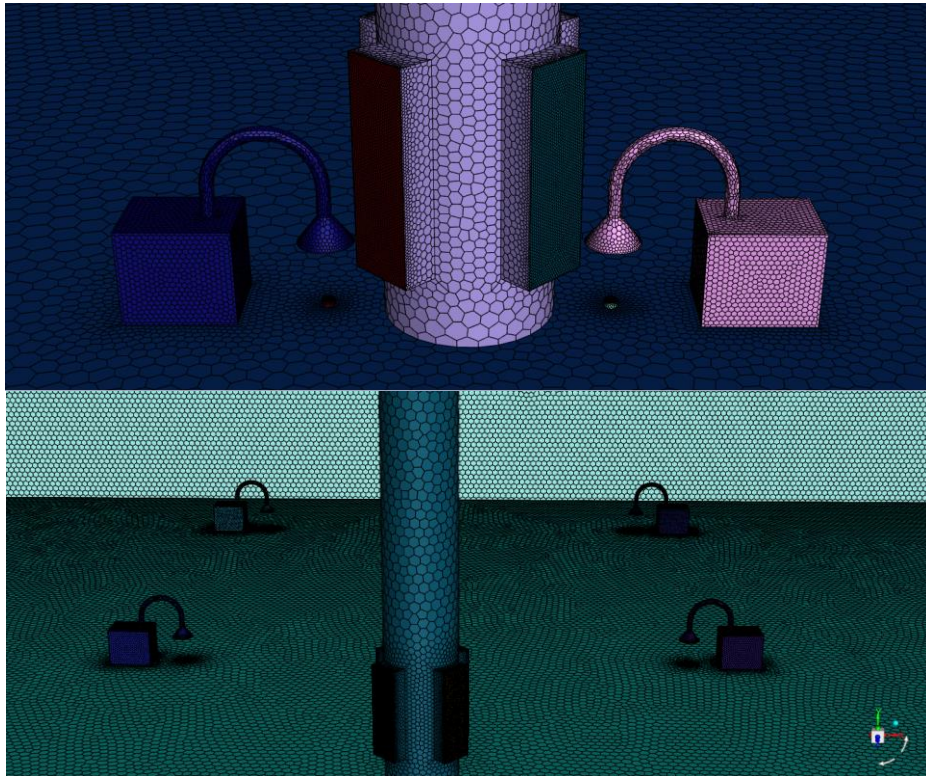


Рисунок 4.5 – Фрагменты расчетных сеток

4.2 Результаты численного моделирования

4.2.1 Влияние положения сварки на эффективность улавливания

Относительное расположение сварочного поста и приточного воздухораспределителя оказывает значительное влияние на эффективность улавливания. Для каждого из характерных положений, представленных в п. 4.1.1 проведено численное моделирование и рассчитана эффективность улавливания. Результаты представлены на рисунке 4.6.

Как показано на этом рисунке, эффективность улавливания сварочного дыма скруббером с водяной завесой существенно различается в зависимости от

положения точки измерения. Так, в точке Д эффективность улавливания составляет лишь 38 %, что свидетельствует о том, что 62 % сварочного аэрозоля не были захвачены пылеуловителем, а вытеснены наружным воздухом, подаваемым из воздухораспределителей, во внутреннюю среду сварочного цеха, становясь взвешенными загрязнителями окружающей среды.

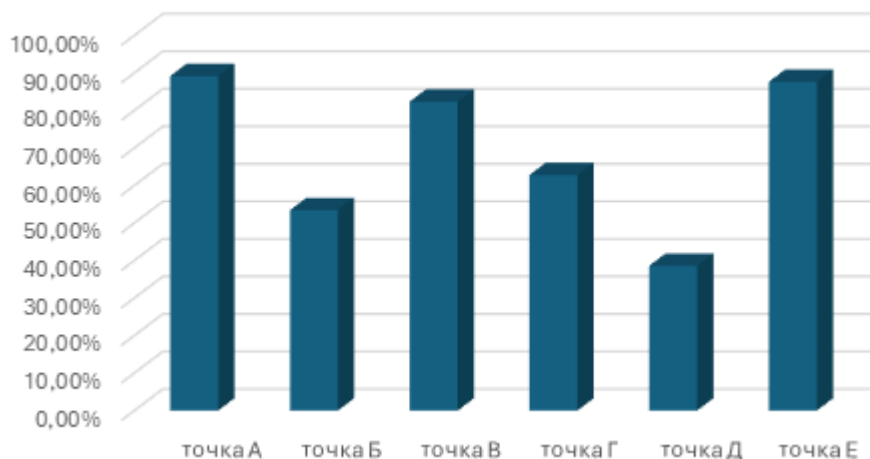


Рисунок 4.6 – Эффективность улавливания сварочного дыма при различных положениях сварки

Причина данного явления связана с взаимодействием приточных струй с процессом захвата аэрозоля пылеуловителем. В данном исследовании предложено решение указанной проблемы путём применения защитного экрана.

4.2.2 Влияние защитного экрана на эффективность улавливания

Защитный экран выполнен в виде двух плоских пластин V-образной конфигурации с геометрическими размерами каждой пластины $0,6 \times 0,6 \times 0,05$ м (длина \times высота \times толщина) и углом между пластинами 120° . Кроме того, защитный экран располагается на линии, соединяющей точку сварки и ближайший к ней воздухораспределитель системы приточной вентиляции, на расстоянии 0,6 м от точки сварки. Схема представлена на рисунках 4.7 и 4.8.

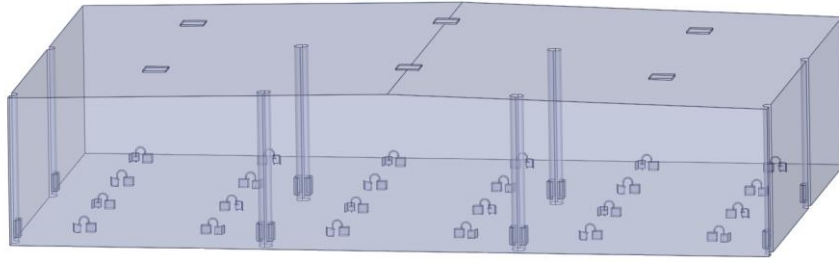


Рисунок 4.7 – Схема системы смешанной вентиляции с защитный экран

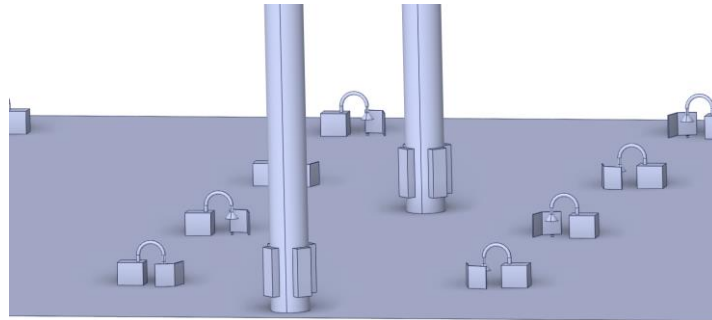


Рисунок 4.8 – Передвижная фильтровентиляционная установка с защитным экраном

Влияние подачи воздуха на работу локального пылеулавливающего устройства обусловлена преимущественно поперечным потоком воздуха. На рисунке 4.9 представлены поля распределения скоростей и концентраций частиц на высоте 0,300 м (уровень точки сварки).

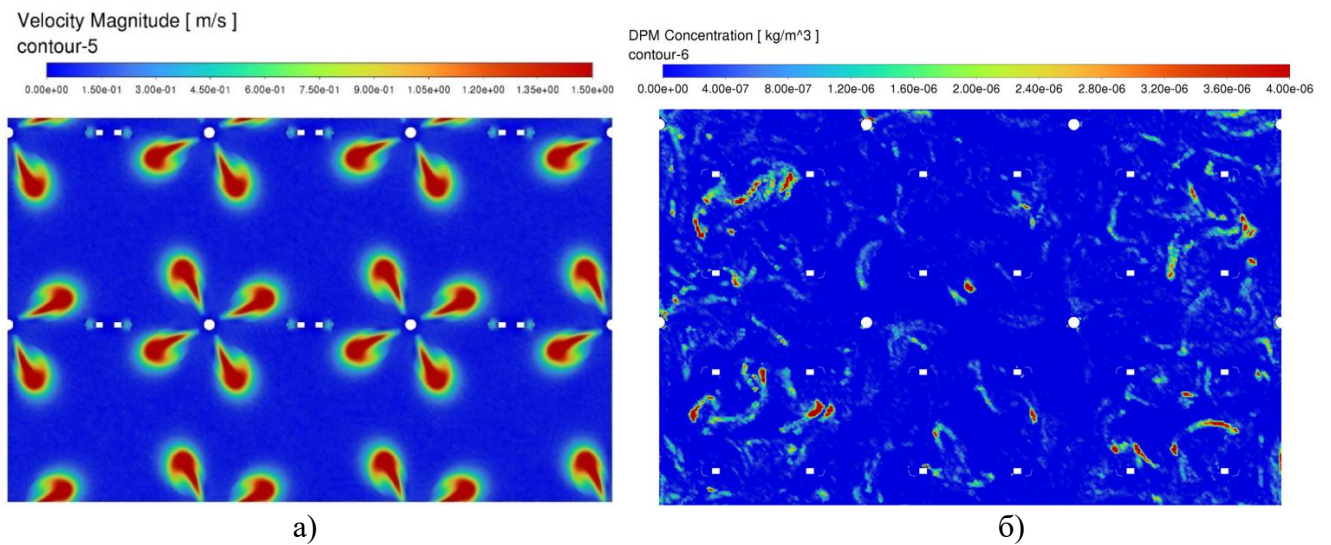


Рисунок 4.9 – Влияние защитного экрана на эффективность улавливания

а – поле скорости; б – поле концентрации частиц

Видно, что экран обеспечивает защиту скоростного поля в зоне под зонтом пылеулавливателя от воздействия поперечного потока воздуха из приточной системы, способствуя повышению эффективности улавливания дыма и, как следствие, улучшению очистки сварочного аэрозоля.

После установки защитного экрана при неизменных параметрах подачи воздуха (скорость подачи и пр.) эффективность улавливания частиц на всех позициях существенно повысилась (рисунок 4.10). Так, в сварочных точках А и Е эффективность достигла более 99 %, а в наименее благоприятной точке Д – 79 %. С учётом расчётной эффективности локального пылеулавливающего устройства, составляющей 90 %, в сварочной точке улавливается и очищается около 80 % частиц локальной вентиляционной системой, что эквивалентно снижению суммарного выброса частиц от источника загрязнения на 80 %. По расчёту 20 % частиц не проходят через локальную систему пылеулавливания и попадают в воздушную среду цеха.

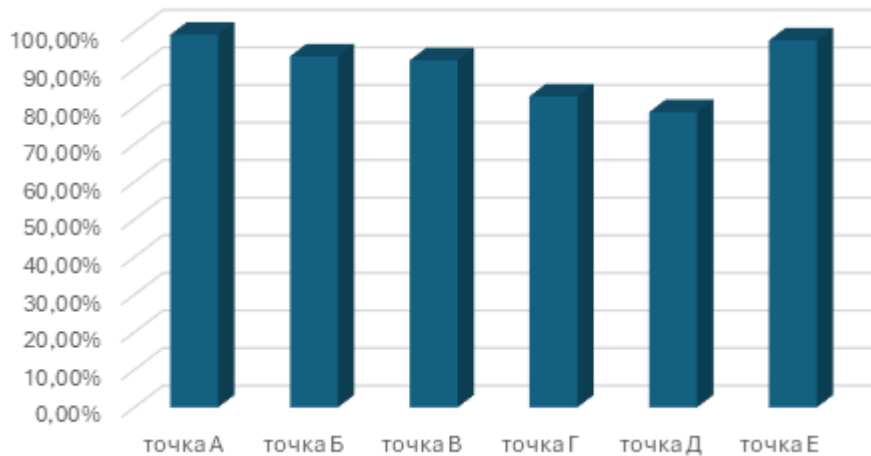


Рисунок 4.10 – Эффективность улавливания сварочного аэрозоля при различных положениях сварки с применением защитного экрана

На рисунке 4.11 приведены зависимости изменения площади зон превышения ПДК загрязнений во времени при использовании только общеобменной вентиляции и при включении местного отсоса после установки защитного экрана.

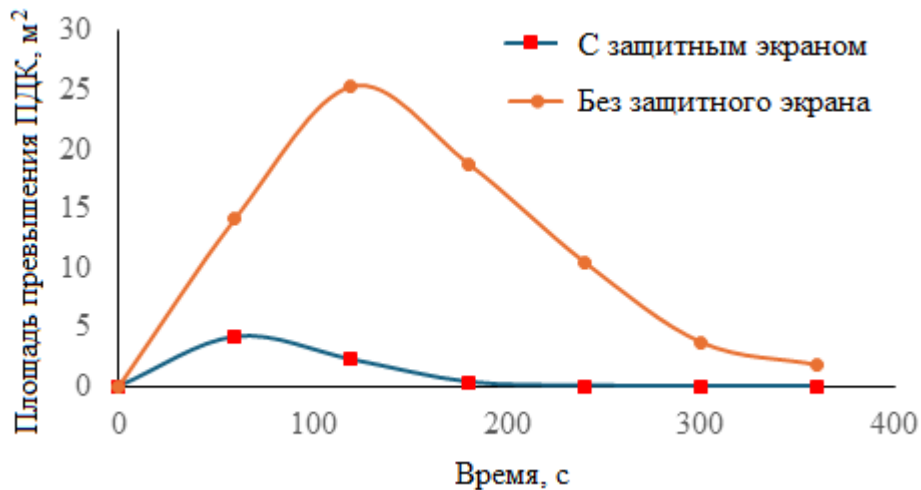


Рисунок 4.11 – Изменение площади зоны превышения ПДК до и после применения защитного экрана

Результаты демонстрируют, что при установке локальной системы вентиляции и пылеулавливания эффективность очистки воздуха существенно повышается.

4.3 Техничко-экономическая оценка эффективности систем вентиляции

На основании сравнительного анализа сметной стоимости и эксплуатационных расходов предложенной системы смешанной вентиляции с регулируемым по направлению воздухораспределителями и традиционной системы с постоянным расходом воздуха проведена оценка экономической эффективности технологической установки «Очистка воздуха от сварочного дыма в крупных сварочных цехах». При оценке учтены эксплуатационные затраты на систему вентиляции и стоимость локальных устройств очистки воздуха.

Вариант 1 – традиционная система вентиляции с постоянным расходом воздуха; без местных очистных устройств, с учётом конструкции данного цеха, потребуется всего 10 вентиляторов мощностью 55 кВт каждый. Производительность одного вентилятора составляет от 53 000 до 72 000 м³/ч. Для поддержания скорости подачи воздуха в каждый приточный патрубок на уровне 2 м/с.

Вариант 2 – система общеобменной вентиляции с регулируемым направлением подачи воздуха и традиционным фильтровальным передвижным устройством очистки воздуха. В данном случае в общеобменной системе вентиляции используются те же вентиляторы, что и в варианте 1, но дополнительно используется традиционный фильтровентиляционный агрегат. Основным элементом этого местного очистного устройства является рукавная фильтровальная мембрана. В данном случае используется фильтровальная мембрана класса G8 по стандартам ЕС, марки WinTech 95 производства компании Donaldson. Общая эффективность очистки данной мембраны достигает 75%, что несколько ниже, чем у гибридной водяной системы очистки, применяемой в варианте 3. Цена одной мембраны составляет 100 $\text{Y}/\text{м}^2$, что делает её достаточно экономичным вариантом. Если же использовать мембрану класса E12, её цена достигнет 240 $\text{Y}/\text{м}^2$. В данном исследовании консервативный вариант (т.е. мембрана класса G8) принят в качестве базового для сравнительного экономического анализа. В данном цехе имеется 80 передвижных сварочных постов, и теоретически требуется 80 очистных устройств.

Вариант 3 – система общеобменной вентиляции с регулируемым направлением подачи воздуха и комбинированной передвижной установкой (лопастное перемешивание с водяное орошение). Оборудование общеобменной вентиляционной системы в данном случае такое же, как в варианте 1: установлено десять высокопроизводительных вентиляторов. Что касается местных устройств очистки воздуха, то здесь применена гибридная (смешанная) водяная схема очистки, всего установлено 80 устройств мокрой (водяной) очистки воздуха.

4.3.1 Основа оценки и описание параметров

Для научно обоснованной оценки практической значимости системы «вращающаяся подача воздуха с комбинированной мобильной очисткой», в работе выполнен сравнительный анализ трех вариантов вентиляции и очистки.

Вариант 1 отражает традиционный подход, широко применяемый на малых и средних сварочных предприятиях Китая, и служит экономическим ориентиром (базовым уровнем) для оценки эффективности новых технологий.

Вариант 2 представляет собой основное современное направление оптимизации – сочетание вращающейся подачи воздуха с рукавными фильтрами.

Вариант 3 является ключевой инновационной схемой данного исследования, интегрирующей вращающуюся подачу воздуха с комбинированными передвижными установками (механическое перемешивание с водяным орошением).

Сравнение данных вариантов, существенно различающихся по техническим решениям, эффективности очистки и составу оборудования, направлено на поиск оптимального баланса между первоначальными инвестициями и эксплуатационными затратами при условии строгого соблюдения норм ПДК (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Сравнение различных вариантов систем вентиляции

№ варианта	Наименование варианта	Технический состав	Соответствие ПДК	Обоснование выбора
Вариант 1	Традиционная общеобменная вентиляция с постоянным расходом воздуха	10 вентиляторов по 55 кВт, без местной очистки	Не соответствует ПДК	Базовый ориентир для сравнения (традиционный подход в отрасли)
Вариант 2	Вращающаяся подача воздуха с фильтровальной местной очисткой (конфигурация G8)	Вращающаяся подача воздуха и 80 рукавных фильтров (мембрана G8, 10 м ² /ед.)	В основном соответствует	Представляет собой основное техническое направление «оптимизированного по затратам» типа
Вариант 3	Вращающаяся подача воздуха с комбинированной передвижной установкой (местное перемешивание с водяным орошением)	Вращающаяся подача воздуха и 80 комбинированных передвижных установок (местное перемешивание с водяным орошением)	Хорошее соответствие	Интегральная инновационная схема, предлагаемая в данном исследовании

Хотя в варианте 1 качество воздуха не достигает нормативных значений (ПДК), данный вариант всё ещё широко применяется в малых и средних сварочных цехах Китая. Включение его в сравнение позволяет количественно оценить комплексный разрыв между традиционной моделью («здоровье в обмен на экономию») и новыми технологиями.

1. Основа для выбора базовых параметров.

1) Режим работы и тариф на электроэнергию. Годовое количество рабочих часов принято в соответствии с фактическим производственным режимом исследуемого сварочного цеха:

$$T_{\text{год}} = 8 \frac{\text{ч}}{\text{день}} \times 6 \frac{\text{дней}}{\text{нед}} \times 52 \frac{\text{нед}}{\text{год}} = 2496 \text{ ч} \approx 2500 \text{ ч}. \quad (4.1)$$

Промышленный тариф на электроэнергию принимается в соответствии с утверждённым местным нормативом

$$T_{\text{эл}} = 0,8 \text{ ¥}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \quad (4.2)$$

2) Основа для выбора параметров фильтровальной мембраны G8. Расчёт затрат на замену фильтровальной мембраны включает четыре ключевых параметра, которые приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры для расчета затрат на замену фильтровальной мембраны

Параметр	Обозначение	Значение	Основание для выбора
Количество пылеуловителей	$N_{\text{устр}}$	80 шт.	Определено исходя из планировки рабочих мест в цехе
Площадь мембраны на один аппарат	$S_{\text{фильтр}}$	10 м ² /шт.	Уменьшено вдвое по сравнению с исходными 20 м ² , пересчитано исходя из скорости фильтрации 1,6 м/мин
Цена одной мембраны	$C_{\text{единица}}$	100 ¥/м ²	Средняя отраслевая закупочная цена для класса G8, на 50% ниже, чем для класса E12
Годовое количество замен	$N_{\text{замен}}$	4 раз/год	Период замены – 3 месяца; из-за низкой пылеемкости мембраны G8 требуется сокращение межсервисного интервала

Мембрана G8 согласно ГОСТ Р ЕН 779–2014 [159] обеспечивает эффективность улавливания частиц размером 0,3 мкм на уровне 85–95%, что ниже, чем у класса E12 ($\geq 99,5\%$). Для обеспечения стабильного достижения требуемой концентрации на выходе в данном анализе принята консервативная стратегия:

компенсация разницы в эффективности за счёт сокращения межсервисного интервала.

3) Основание для сокращения вдвое трёх видов скрытых затрат. В таблице 4.3 приведены основания для сокращения затрат.

Таблица 4.3 – Основания для сокращения затрат

Наименование затрат	Диапазон значений	Принятое значение	Основание для сокращения затрат вдвое
Затраты на очистку фильтровальных рукавов	25 000–50 000 ¥	25 000 ¥/год	В некоторых цехах применяется автоматизированное управление для оптимизации стратегии очистки
Затраты на утилизацию опасных отходов	40 000–80 000 ¥	40 000 ¥/год	В отдельных регионах действуют субсидии или льготные тарифы на централизованную утилизацию рукавов, содержащих тяжёлые металлы
Потери от простоев	30 000–100 000 ¥	30 000 ¥/год	Частичную замену можно проводить в нерабочее время; водяные установки также требуют регулярного обслуживания

Что касается факторов, влияющих на три вида затрат, то в данном случае на основе оценочных диапазонов, предоставленных эксплуатационным и сбытовым персоналом предприятия, принят вариант с минимальными значениями. Такой подход направлен на определение «надёжного нижнего предела» экономической эффективности варианта 3. Даже при консервативной (осторожной) оценке скрытых затрат, если вариант 3 всё равно сохранит свои преимущества, выводы будут обладать высокой убедительностью.

4.3.2 Калькуляция затрат и анализ экономической эффективности

1. Расчёт затрат на электроэнергию

Для расчёта затрат на электроэнергию используется общепринятая формула:

$$C_{\text{эл}} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m (N_i \cdot n_i) \right] \cdot T_{\text{год}} \cdot T_{\text{эл}}}{10^3}, \text{ тыс. ¥/год}, \quad (4.3)$$

где N_i – номинальная мощность одной единицы оборудования (кВт);

n_i – количество единиц однотипного оборудования (шт.);

$T_{\text{год}} = 2,500$ ч – годовое количество часов работы;

$T_{\text{эл}} = 0,8$ ¥/(кВт·ч) – расчётный промышленный тариф на электроэнергию, принятый на основе действующих региональных тарифов Китая и используемый в качестве усреднённого значения для сравнительного экономического анализа. [161].

В таблице 4.4 приведено сравнение состава мощности и затрат на электроэнергию по двум вариантам систем вентиляции.

Таблица 4.4 – Сравнение состава мощности и затрат на электроэнергию по двум вариантам

Электроприёмник	Мощность ед.	Кол-во	мощность, вариант 2	мощность, вариант 3	Примечание
Вентиляторы общеобменной вентиляции	55 кВт	10 шт.	550 кВт	550 кВт	Общие для трёх вариантов
Привод вращающего механизма	50 Вт	80 шт.	4 кВт	4 кВт	Вариант 2 и Вариант 3
Местные вентиляторы	1 кВт / 1,5 кВт	80 шт.	80 кВт	120 кВт	У комбинированных местных установок сопротивление немного выше
Двигатель перемешивания	300 Вт	80 шт.	0	24 кВт	Только для варианта 3
Водяной насос орошения	5 Вт	80 шт.	0	0,4 кВт	Только для варианта 3
Итого мощность	—	—	634 кВт	698,4 кВт	—
Годовые затраты на электроэнергию	—	—	1,268 млн ¥	1,397 млн ¥	Расчёт см. ниже

Проведен расчет потребляемой мощности и стоимости электроэнергии для варианта 3.

$$P_3 = 10 \cdot 55 + 80 \cdot 0,05 + 80 \cdot 1,5 + 80 \cdot 0,3 + 80 \cdot 0,005 = 698,4 \text{ кВт},$$

$$C_{\text{эл}} = 698,4 \cdot 2500 \cdot 0,8 = 1,397 \text{ млн ¥/год.} \quad (4.4)$$

Анализ сравнения расхода на электроэнергию показывает, что по Варианту 3 имеет место превышение по годовым затратам по сравнению с Вариантом 2 на:

$$\Delta C_{\text{эл}} = 1,397 - 1,268 = 0,129 \text{ млн ¥/год.} \quad (4.5)$$

Возрастание затрат на электроэнергию обусловлено, главным образом, увеличением двигателей перемешивания (24 кВт) в водяных пылеуловителях, а также использованием местных вентиляторов большей мощности (на 40 кВт выше, чем в фильтровальной системе). Однако дополнительная (потребляемая мощность) на одну установку в размере 0,855 кВт составляет всего 0,16% от общей мощности системы общеобменной вентиляции, что является обоснованным техническим усилением.

2. Расчёт затрат на расходные материалы и техническое обслуживание

В таблице 4.5 приведены затраты на расходные материалы и техническое обслуживание двух систем вентиляции.

Таблица 4.5 – Расчет затрат на расходные материалы и техническое обслуживание

Наименование затрат	Расчёт затрат	Вариант 2	Вариант 3	Примечание
затраты на замену фильтровальной мембраны	80 (устройство) × 10 (м ²) × 100 (¥/м ²) × 4 (раза/год) = 320 тыс. ¥/год	☑	✗	на каждый аппарат местной фильтровальной очистки требуется 10 м ² мембраны
затраты на очистку фильтровальных рукавов	25 тыс. ¥/год	☑	✗	каждые две недели требуется импульсная продувка рукавов сжатым воздухом
затраты на утилизацию опасных отходов	40 тыс. ¥/год	☑	✗	отработанные фильтровальные рукава требуют специальной утилизации
потери от простоев	30 тыс. ¥/год	☑	✗	время, затрачиваемое на импульсную очистку мембраны, приводит к остановке оборудования

Несмотря на использование более дешёвой фильтровальной мембраны G8, уменьшение площади и консервативную оценку скрытых затрат, годовые расходы на расходные материалы и обслуживание по варианту 2 всё равно достигают 435 тыс. юаней/год, тогда как по варианту 3 они равны нулю. Преимущество,

обеспечиваемое характеристикой «отсутствие фильтровальных рукавов», остаётся значительным.

3. Расчёт и сравнение первоначальных инвестиций

Первоначальные инвестиции включают затраты на приобретение оборудования, а также затраты на монтаж и пусконаладку.

$$K_{\text{КАП}} = K_{\text{оборуд}} + K_{\text{монтаж_наладка}} \quad (4.6)$$

При этом затраты на монтаж и пусконаладку принимаются в размере 18% от стоимости оборудования (в том числе 15% – на монтаж и 3% – на пусконаладку).

Вариант 2: первоначальные инвестиции:

$$K_{\text{оборуд,2}} = 80 \times 3000 = 240 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.7)$$

$$K_{\text{монтаж_наладка,2}} = 240 \times 18\% = 43,2 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.8)$$

$$K_{\text{КАП,2}} = 240 + 43,2 = 283,2 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.9)$$

Вариант 3: первоначальные инвестиции:

$$K_{\text{оборуд,3}} = 80 \times 8000 = 640 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.10)$$

$$K_{\text{монтаж_наладка,3}} = 640 \times 18\% = 115,2 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.11)$$

$$K_{\text{КАП,3}} = 640 + 115,2 = 755,2 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.12)$$

Разность первоначальных инвестиций:

$$\Delta K_{\text{КАП}} = 755,2 - 283,2 = 472 \text{ тыс. } \text{¥} \quad (4.13)$$

Исходя из стоимости традиционного фильтровального очистного устройства 3000 ¥ за единицу и стоимости комбинированного мокрого очистного устройства 8000 ¥ за единицу, первоначальные инвестиции по варианту 3 превышают инвестиции по варианту 2 на 472 тыс. ¥. Данная цена рассчитана производственным заводом на основе себестоимости и не включает торговую наценку (прибыль) брендовых компаний на рынке.

4.3.3 Комплексная технико-экономическая оценка

Поскольку вариант 1 не обеспечивает соблюдение нормативов качества воздуха в помещении, необходимо применять системы с местными устройствами

очистки воздуха, то есть варианты 2 и 3. Согласно результатам отраслевых исследований, после модернизации по варианту 2 можно достичь соответствия нормативам качества воздуха, однако для этого требуется фильтровальная мембрана более высокого класса, чем G8. В данном исследовании используется мембрана именно этого (более высокого) класса в качестве объекта сравнения, чтобы доказать, что предлагаемая гибридная мокрая пылеочистная установка обладает лучшей экономической эффективностью.

Согласно результатам экономических расчётов, годовые затраты на электроэнергию по варианту 3 выше, чем по варианту 2, на 129 тыс. ¥/год. Однако по варианту 2 дополнительно учитываются эксплуатационные расходы, связанные с заменой фильтровальных мембран, очисткой фильтровальных рукавов, утилизацией загрязнённых фильтрующих элементов и потерями от простоев оборудования, которые в сумме составляют 415 тыс. ¥/год. Таким образом, с учётом затрат на расходные материалы и техническое обслуживание совокупные годовые эксплуатационные расходы по варианту 3 оказываются ниже, чем по варианту 2, на 286 тыс. ¥/год. При этом первоначальные инвестиции по варианту 3 превышают инвестиции по варианту 2 на 472 тыс. ¥.

В этом случае срок окупаемости дополнительных капитальных вложений определяется как отношение разности первоначальных инвестиций к годовой экономии эксплуатационных затрат: $T = 472 / 286 \approx 1,65$ года. Следовательно, расчётный срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составляет около 1,65 года. С учётом срока службы оборудования 7–10 лет, экономическая эффективность варианта 3 выше, чем варианта 2.

При использовании схемы 3 наряду с улавливанием аэрозольных частиц применяется передвижное устройство очистки воздуха, что позволяет реализовать совместное удаление многокомпонентных загрязнений в единой установке. Данное техническое решение исключает необходимость в дополнительном оборудовании для очистки, снижая капитальные затраты, и имеет существенное значение для охраны здоровья работников.

Таким образом, применение схемы 3 демонстрирует не только высокую эффективность пылеулавливания, но и существенный потенциал в комплексной защите персонала от комбинированных профессиональных рисков.

4.4 Выводы

Для оценки эффективности предлагаемых технических решений усовершенствована численная модель сварочного цеха с учетом принятой системы воздухораспределения общеобменной приточной вентиляции и передвижных фильтровентиляционных агрегатов.

Дополнительно рассмотрен вариант с установкой защитного экрана на передвижном агрегате для снижения влияния приточной струи на устойчивость сварочного факела и эффективность улавливания сварочного аэрозоля.

Получены поля скорости движения воздуха и концентрации твердых частиц. Результаты численного моделирования подтверждают эффективность применения разработанных технических решений.

В результате технико-экономического анализа срок окупаемости наиболее эффективного варианта систем вентиляции составляет 3,7 года.

Заключение

В результате проведенных исследований состояния воздушной среды сварочных цехов при применении высокоэффективных передвижных местных устройств для улавливания твердых мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм (PM10) и предлагаемой конструкции воздухораспределителя обеспечены нормативные требования к воздуху рабочей зоны. Достигнута цель и решены задачи исследования:

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований в области совершенствования технических решений систем вентиляции и пылеудаления в сварочных цехах;

2. В натуральных условиях реального производства установлен дисперсный состав сварочного аэрозоля и зависимости изменения концентраций во времени на рабочих местах сварщиков при использовании общеобменной вентиляции;

3. Разработана новая конструкция воздухораспределителя с вращающимися решётками для общеобменной системы приточной вентиляции; усовершенствована математическая модель распространения твёрдых частиц сварочного аэрозоля в сварочном цехе при её использовании. Получены аппроксимирующие зависимости средней по времени концентрации частиц в рабочей зоне и средней суммарной массы частиц PM10 в объёме цеха от скорости подачи воздуха, размера частиц и их пористости. На основе нормированного анализа установлена относительная значимость факторов, влияющих на распространение сварочного аэрозоля;

4. Разработаны конструкции высокоэффективных передвижных местных устройств очистки воздуха и лабораторный стенд для исследования их эффективности; для заданных расчётных условий получены аппроксимирующие зависимости изменения площади газожидкостного контакта во времени, на основе которых выполнено сравнительное оценивание различных конструктивных вариантов;

5. Усовершенствована математическая модель очистки воздуха в местном передвижном агрегате, получены зависимости эффективности очистки для предлагаемых способов подачи воды от скорости потока воздуха на входе, частоты вращения мешалки и размеров частиц;

6. Разработана численная модель воздушного режима сварочного цеха с использованием предлагаемых технических решений воздухораспределения и местных фильтровентиляционных агрегатов, определена эффективность систем вентиляции и пылеудаления;

7. Определены технико-экономические показатели предложенных технических решений систем вентиляции и пылеудаления. Установлено, что наиболее рациональным решением для крупных сварочных цехов является комбинированная система, предусматривающая совместное применение общеобменной приточной вентиляции и передвижных местных устройств очистки воздуха. Для снижения отрицательного влияния приточного потока на процесс локального улавливания сварочного аэрозоля рекомендуется использовать противоветровые экранирующие элементы.

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении повышения эффективности улавливания мелкодисперсных и ультрадисперсных частиц сварочного аэрозоля размерами менее 10 мкм, включая частицы PM_{2,5} и субмикронного диапазона. Особый интерес представляет изучение процессов переноса, коагуляции, осаждения и повторного вовлечения частиц в воздушный поток в условиях реальных сварочных производств.

Перспективным направлением является также разработка интеллектуальных систем вентиляции и пылеудаления с адаптивным регулированием параметров воздухообмена на основе данных мониторинга качества воздуха в режиме реального времени.

Список литературы

1. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов / М.И. Гримитлин, О.Н. Тимофеева, В.М. Эльтерман и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 272 с.
2. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных предприятий / М.И. Гримитлин, Г.М. Позин, О.Н. Тимофеева и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 286 с.
3. Wehner B., Wiedensohler A., Koziar C., Weise D., Gartzke J. Size-segregated aerosol properties in the welding environment of a ship yard // *Dust, fumes and mists in the workplace: Risks and their prevention.* — 2001.
4. Bu Z., Peng Z., Shi Y., Fukuchi N. Numerical simulation of welding aerosol diffusion in welded structure workshop // *Transactions of the China Welding Institution.* — 2007. — Vol. 28. — No. 2. — P. 43-46.
5. Isaxon C., Pagels J., Gudmundsson A., Asbach C., John A.C., Kuhlbusch T.A.J., Karlsson J.E., Kammer R., Tinnerberg H., Nielsen J. Characteristics of welding fume aerosol investigated in three Swedish workshops // *Journal of Physics Conference Series* 151 (2009) 012059.
6. Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Ennan A.A. Formation of primary particles in welding fume // *Journal of Aerosol Science.* — 2013. — Vol. 58. — P. 9-16.
7. Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A. Effect of shielding gas temperature on the welding fume particle formation: Theoretical model // *Journal of Aerosol Science.* — 2018. — Vol. 124. — P. 112-121.
8. Brand P. Number Size Distribution of Fine and Ultrafine Fume Particles From Various Welding Processes / P. Brand, K. Lenz, U. Reisgen, T. Kraus // *The Annals of Occupational Hygiene.* — 2013. — Vol. 57, No. 3. — P. 305–313.
9. Pili S., Lecca L.I., Pedrazzi T., Ghitti R., Murru A., Uras M., Fabbri D., Campagna M., De Palma G. Exposure assessment to fine and ultrafine particulate matter during welding activity in the maintenance shop of a steelmaking factory // *Heliyon.* — 2024. — Vol. 10, No. 23. — Article e40815.

10. Liu Q., Wei B., Long Y., Lu Y. The Simulation Study on the Welding Smoke Control of Tall Workshop by Inducement Type Ventilation // Proceedings of the 1st International Conference on Numerical Modelling in Engineering : Lecture Notes in Mechanical Engineering/ ed. M. Abdel Wahab. — Singapore: Springer Singapore, 2019. — P. 259-273.

11. Knott P., Csorba G., Bennett D., Kift R. Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods // Safety. — 2023. — Vol. 9, No. 3. — Article 42. — P. 1–14.

12. Paridokht F., Soury S., Karimi Zeverdegani S. The simulation of the emission of iron fumes caused by shielded metal arc welding using a computational fluid dynamics method // Toxicology and Industrial Health. — 2023. — Vol. 39. — No. 1. — P. 36-48.

13. Rafiee A., Wishart D.S., Yamamoto S.S., Pei L., Quecke E., Quémerais B. Assessing welding fume exposure in professional welders: An exploratory study of biomarkers and metabolomic profiles // International Journal of Hygiene and Environmental Health. — 2026. — Vol. 271. — Article 114714.

14. Hedberg Y.S., Wei Z., McCarrick S., Romanovski V., Theodore J., Westin E.M., Wagner R., Persson K.-A., Karlsson H.L., Odnevall Wallinder I. Welding fume nanoparticles from solid and flux-cored wires: Solubility, toxicity, and role of fluorides // Journal of Hazardous Materials. — 2021. — Vol. 413. — Article 125273. — 13 p.

15. Momen N.C., Baker M.G., Driscoll T., Li J., Martínez-Silveira M.S., Turner M.C., Viegas S., Villeneuve P.J., Pega F. The effect of occupational exposure to welding fumes on trachea, bronchus, and lung cancer: A supplementary analysis of regular occupational exposure and of occasional occupational exposure based on the systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint estimates of the work-related burden of disease and injury // Environment International. — 2025. — Vol. 196. — Article 109216. — 48 p.

16. Controlling fumes and ultraviolet radiation exposure from welding and minimising the associated risk of cancer – review of published evidence: Final Report / Driscoll T. – ELMATOM Pty Ltd, July 2020. – 62 p.

17. Zhivov A.M. Principles of Source Capturing and General Ventilation Design for Welding Premises / A.M. Zhivov // ASHRAE Transactions. — 1993. — Vol. 99, Pt. 1. — P. 979–986.

18. Chen S. Research Status of Ventilation Method in Welding Workshop // Proceedings of the 2017 International Conference on Society Science (ICoSS 2017) 2017 International Conference on Society Science (ICoSS 2017). — Shenyang, China: Atlantis Press, 2017.

19. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design / American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 30th ed. Cincinnati : ACGIH, 2019. 744 p.

20. GBZ 2.1—2019. Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace — Part 1: Chemical hazardous agents. — Beijing: National Health Commission of the People's Republic of China, 2019. — 53 p.

21. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : санитарные правила и нормы : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2. — М., 2021.

22. American Conference of Governmental Industrial Hygienists Threshold Limit Values (TLVs®) and Biological Exposure Indices (BEIs®). — Cincinnati, Ohio: ACGIH, 2019.

23. Recommendation of occupational exposure limits (2023–2024): The Japan Society for Occupational Health / рук. The Japan Society for Occupational Health. — Tokyo, 10.05.2023.

24. Tashiro S., Zeniya T., Murphy A.B., Tanaka M. Visualization of fume formation process in arc welding with numerical simulation // Surface & Coatings Technology. 2013. Vol. 228, Suppl. 1. P. S301–S305.

25. Cao Z., Wang Y., Duan M., Zhu H. Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system // Energy and Buildings. — 2017. — Vol. 142. — P. 39-48.

26. He X., Liu Q., Zhang H., Kui M.-Q., Tan X.-H., Li X.-P. Numerical investigation of the performance of moisture separators based on two-way coupling model by Lagrangian-Eulerian methodology // *Annals of Nuclear Energy*. — 2019. — Vol. 124. — P. 407-417.
27. Yuan Z. Gas-solid two-phase flow and numerical simulation. — Nanjing: Southeast University Press, 2013.
28. Вараксин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 192 с.
29. Maxey M. R., Riley J. J. Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow // *Physics of Fluids*. 1983. Vol. 26, No. 4. P. 883–889.
30. Liu J. Kinetic Characterisation of Metal Particles in Gas-Solid Multiphase Thermal Flow Field : PhD Thesis / J. Liu. — Harbin, China: Harbin Engineering University, 2012.
31. Ho B. P., Leal L. G. Inertial migration of rigid spheres in two-dimensional unidirectional flows // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1974. — Vol. 65, №. 2. — P. 365-400.
32. Yu C., Qi H., Xu X. Numerical simulation of Magnus force on pulverised coal particles // *Journal of Engineering Thermophysics*. — 2001. — Vol. 22. — No. 5. — P. 625-628.
33. Моренко, И. В. О влиянии частиц примеси на сопротивление и теплоотдачу кругового цилиндра, обтекаемого вязкой жидкостью / И. В. Моренко, В. Л. Федяев. — Текст : непосредственный // *Вестник Казанского технологического университета*. — 2013. — Т. 16, № 20. — С. 251–254.
34. Kirichenko K.Yu. Nano- and Microparticles in Welding Aerosol: Granulometric Analysis // *Physics Procedia*. — 2017. — Vol. 86. — P. 50-53.
35. He C., Ahmadi G. Particle Deposition with Thermophoresis in Laminar and Turbulent Duct Flows // *Aerosol Science and Technology*. — 1998. — Vol. 29. — No. 6. — P. 525-546.

36. Walsh J.K., Weimer A.W., Hrenya C.M. Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles in Laminar Tube Flow with Mixed Convection // *Journal of Aerosol Science*. — 2006. — Vol. 37. — No. 6. — P. 715-734.

37. Chen Z. Aerosol particle motion and heat and mass transfer in temperature field : PhD dissertation / Z. Chen. — Sichuan University, 2012.

38. Miracco G., Nicoletti F., Ferraro V., Kaliakatsos D. Innovative Mechanical Ventilation Control for Enhanced Indoor Air Quality and Energy Efficiency // *Energy Engineering*. — 2025. — Vol. 122. — No. 3. — P. 861-883.

39. Van Hooff T., Blocken B. Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics // *Indoor and Built Environment*. 2020. Vol. 29, No. 4. P. 603–620.

40. Baran A., Zender-Świercz E. Concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ Particulate Matter in Various Indoor Environments: A Literature Review // *Atmosphere*. 2026. Vol. 17, No. 1. Article 45.

41. Cacpata-Bastidas J., Vaca X., Cevallos-Yáñez D., Simbaña I. CFD Analysis and Improvement Proposal for the Fume Extraction System in a Welding Workshop // *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society : Lecture Notes in Networks and Systems/ eds. E.M. Inga Ortega, N. García Herranz, V.E. Robles-Bykbaev, E. Gallego Diaz*. — Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. — Vol. 1331. — P. 406-416.

42. Ren Y.-F., Huang Q., Marzouk T., Richard R., Pembroke K., Martone P., Venner T., Malmstrom H., Eliav E. Effects of mechanical ventilation and portable air cleaner on aerosol removal from dental treatment rooms // *Journal of Dentistry*. — 2021. — Vol. 105. — P. 103576.

43. Rodríguez M., Palop M.L., Seseña S., Rodríguez A. Are the Portable Air Cleaners (PAC) really effective to terminate airborne SARS-CoV-2? // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 785. — P. 147300.

44. Fennelly M., Hellebust S., Wenger J., O'Connor D., Griffith G.W., Plant B.J., Prentice M.B. Portable HEPA filtration successfully augments natural-ventilation-

mediated airborne particle clearance in a legacy design hospital ward // *Journal of Hospital Infection*. — 2023. — Vol. 131. — P. 54-57.

45. Hu Manyin, Zhao Yi, Liu Zhong. Dust removal technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

46. Lv Yugui. Application of cyclone dust removal technology in sulfuric acid industry[J]. *Chemical process and equipment*, 2009,8(9):125-126

47. Li B., Sun Memorial. Principle and application of electric dedusting [J] . *Henan Chemical Industry*, 2003,12(4):32-33.

48. Jin Xiaofeng, Wang Enlu, Wang Changpu. Comparison of the performance of various dust removal technologies and the application prospect of fabric dust collector in China [J] *Boiler Technology*, 2007, 38(1):8-12.

49. Meikap A. K., Jaworek A., Krupa A., Czech T. Review of conventional and novel wet scrubbing technologies for industrial gas cleaning // *Journal of Environmental Engineering*. — 2002. — Vol. 128, №. 5. — P. 456-465.

50. Sbrizzai F, Faraldi P, Soldati A. Appraisal of three-dimensional numerical simulation for sub-micron particle deposition in a micro-porous ceramic filter[J].*Chemical Engineering Science*,2005,60(23):6551-6563.

51. Zou Shushu, Wang Jun, Tian Mengkui, et al. Current status of research and application of PM2.5 fine particulate matter capture equipment [J]. *Applied Technology*:33-42.

52. Li Y W, Zhao C S, Wu X, et al. Aggregation experiments on fine fly ash particles in uniform magnetic field [J], *Powder Technology*. 2007. Vol. 174, No. 3. P. 93–103.

53. Wei Feng, Zhang Junying, Wang Chunmei, Zheng Chuguang. Research Progress of Agglomeration Promotion Technology for Ultrafine Particulate Matter in Coal Combustion [J] . *Coal Conversion*, 2003,26(3):27-31.

54. Xiang Xiaodong, Chen Wangzhu, Happiness Hall, et al. Theoretical and experimental study of electrocoagulation and dust collection in alternating electric field [J] . *Journal of Environmental Science*, 2000,20(2):187-191.

55. Laitinen A., Hautanen J., Keskinen J. Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar flow // Journal of Electrostatics. 1996. Vol. 38, No. 4. P. 303–315.

56. Luo G., Zhu T., Xiang P. Fractal study on electro-agglomeration of submicron particles // Journal of Electrostatics. — 2010. — Vol. 68, №. 1. — P. 56-62.

57. Chen Wangsheng, Xiang Xiaodong, Lu Jidong. Research on dust collection mechanism and performance of dipole charge electrostatic coagulation dust collector [J] . Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(7):973-976.

58. Zhao Shuang, Luo Zhongyang, Wang Peng, et al. Electrocoagulation and removal of small particles from flue gas of coal-fired boilers [J]. Energy Engineering, 2006(3):34-39

59. Chen H., Zhao B., Xu J. et al. Experimental study on acoustic agglomeration removal of ultrafine particulate matter from coal-fired fly ash [J] . Chinese Journal of Electrical Engineering, 2007, 27(35):28-32.

60. Zhang K. Theoretical and experimental study of acoustic agglomeration of coal combustion fly ash aerosol [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010

61. Hoffmann T.L., Chen W., Koopmann G.H., et al. Experimental and Numerical-analysis of Bimodal Acoustic Agglomeration [J], Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the Asme, 1993,115;232-240

62. Sun D., Guo Q. Experimental study on acoustic field agglomeration of respirable particles [J] . Chemical Engineering, 2010,38(4):81-84.

63. Yang L., Yan J, Shen X. Research status and prospect of vapor phase change for PM2.5 condensation and growth in combustion sources [J]. Modern Chemical Industry, 2005,25(11):22-26.

64. Heidenreich S, Ebert F. Condensational droplet growth as a preconditioning technique for the separation of submicron particles from gases [J]. Chem Eng Process, 1995(3):235-244.

65. Xiong G., Yang L., Yan J., et al. Effect of synergistic steam phase change on the performance of coal-fired fine particles removal by jet [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011,31(32):39-45.

66. Zhang X., Yang L., Sun L., et al. Experimental study of PM2.5 removal from combustion sources by applying vapor phase change mechanism [J]. Journal of Southeast University, 2008,38(1):37-41

67. Yan Jinpei, Yang Linjun, Zhang Xia et al. Experimental study on the wetting agent to promote the capture of fine particulate matter in fuel oil[J]. Journal of Chemical Engineering. 2008,59(10):2616-2621.

68. Fan F., Zhang S., Wang W., Yan J., Su M. Numerical investigation of PM2.5 size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement // Process Safety and Environmental Protection. — 2019. — Vol. 125. — P. 197-206.

69. Cui K., Yang X., Ma X. Efficient capture of fine particles by combining ultrasonic atomization and fiber filtration // Process Safety and Environmental Protection. — 2021. — Vol. 153. — P. 352-362.

70. Bhargava A. Wet scrubbers: design of spray tower to control air pollutants // International Journal of Environmental Planning and Management. — 2016. — Vol. 2, №. 4. — P. 20-27.

71. Sharma A. K., Ali M., Singh S. N., Seshadri V. Wetted wall cyclone — A novel concept // Powder Technology. — 2010. — Vol. 204, №. 1. — P. 36-41.

72. Wang D., He S., Nie W., et al. Experimental study of the dust-removal performance of a wet scrubber // International Journal of Coal Science & Technology. — 2021. — Vol. 8. — P. 719-731.

73. Коновалов, В. С. Исследование эффективности очистки воздуха от пыли поливинилхлорида в скруббере Вентури / В. С. Коновалов, В. М. Ульянов. — Текст : непосредственный // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2016. — № 4-3. — С. 60–63.

74. Бахронов, Х. Ш. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли / Х. Ш. Бахронов, С. У. Ганиева. — Текст : непосредственный // Universum: технические науки. — 2021. — № 10-1 (91). — С. 45–49.

75. Katz, S. H. Wet mesh scrubbers for industrial dust control / S. H. Katz, E. J. MacEwan. – Текст : непосредственный // Journal of the Air Pollution Control Association. – 1969. – Vol. 19, № 8. – P. 560–564.

76. Maczek, K. Development of wet cyclone dust collectors with axial fans in Poland / K. Maczek, A. Warych. – Текст : непосредственный // Chemical Engineering and Processing. – 1978. – Vol. 15, № 3. – P. 112–118.

77. Sparks, L. E. Advances in wet rotary scrubber technology in the United States / L. E. Sparks. – Текст : непосредственный // Environmental Science & Technology. – 1982. – Vol. 16, № 2. – P. 121–126.

78. Krames, J. Experimental investigation of a wet dust scrubber: Dust collection based on turbulent diffusion / J. Krames, H. Büttner, F. Ebert. – Текст : непосредственный // Particulate Science and Technology. – 1991. – Vol. 9, № 1-2. – P. 115–126.

79. Gwon, I. A mathematical model of droplet collision and dust collection efficiency in wet scrubbers / I. Gwon, C. Lee, H. Kim. – Текст : непосредственный // Journal of Aerosol Science. – 2005. – Vol. 36, № 5. – P. 555–570.

80. Вихревой пылеуловитель: пат. RU 2650999С2 Российская Федерация / Тюрин Н.П., Ватузов Д.Н., Пуриг С.М., Тюрин Д.Н.; № 2016117436/16, заявл. 04.05.2016; опубл. 18.04.2018, Бюл. №11.

81. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: 2020

82. Санитарные правила при сварке, наплавке и резке металлов (№ 1009–73). М.: Минздрав СССР, 1973, 27 с.

83. Посохин, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.

84. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве / В.Л. Писаренко, М.Л. Рогинский – М.: Машиностроение, 1981. – 120 с.

85. Гришагин, В. М. Современные системы вентиляции и очистки воздуха от сварочных аэрозолей на промышленных предприятиях / В. М. Гришагин, А. В.

Фролов. – Текст : непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 8. – С. 24–29.

86. Sibsovplym.ru. Приточно-вытяжная фильтровентиляционная система «PUSH-PULL» Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.sibsovplym.ru/catalog/filtervent/sfilters/fvsystems/pushpull/> (дата обращения: 05.04.20)

87. Новосельцев Б.П., Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Сафонов С.А. Совершенствование конструкции местного отсоса в системах вытяжной вентиляции гальванического цеха // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4 (23). С. 52-60.

88. Гримитлин А. М., Позин Г. М. Вентиляция и отопление судостроительных производств // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 6. С. 7-11.

89. Ventportal.com/ Вентиляция сварочного производства. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://ventportal.com/node/253> (дата обращения: 21.03.2026)

90. Ohrana-bgd.ru/ Охрана труда в отрасли для сварочных специальностей. Применяемые местные вытяжные устройства. Электронный ресурс. Режим доступа: http://ohrana-bgd.ru/otras/otras1_13.html (дата обращения: 19.03.2026)

91. Гришагин В.М., Киселев С.В., Филонов А.В / Фильтровентиляционное оборудование сварочного производства: состояние и перспективы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований № 9, 2015. С. 14-17.

92. Трушкова Е. А., Ладная Е. В. Особенности профессиональных заболеваний электросварщиков при выполнении сварочных работ на производстве // Молодой ученый. — 2016. — №18.1. — С. 25-27. —URL. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/122/33781> (дата обращения: 05.04.20)

93. Вадулина Н.В., Закирова З.А., Новикова А.И./ Снижение риска развития профессиональных заболеваний у электрогазосварщиков // Безопасность труда в промышленности / Издательство: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности (Москва) ISSN: 0409-2961eISSN: 2658-5537

94. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 2024 ASHRAE Handbook – Fundamentals. – Atlanta, GA: ASHRAE, 2024.

95. Harrison F.L., Bishop D.J., Mallon B.J. Comparison of organic combustion products in fly ash collected by a Venturi wet scrubber and an electrostatic precipitator at a coal-fired power station // *Environmental Science & Technology*. – 1985. – Vol. 19. – № 2. – P. 186-193.

96. Mikropul H. Innovative wet electrostatic precipitator technology // *Filtration & Separation*. – 1998. – Vol. 35. – № 5. – P. 433-435.

97. Bologna A., Paur H.R., Seifert H., Wascher Th., Woletz K. Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol // *Journal of Electrostatics*. – 2009. – Vol. 67. – № 2-3. – P. 150-153.

98. Sune B., Rikard H. WET ELECTROSTATIC PRECIPITATOR. – US, 2009.

99. Kim H.J., Han B., Kim Y.J., Hwang K.D., Oh W.S., Yoo S.Y., Oda T. Fine Particle Removal Performance of a Two-Stage Wet Electrostatic Precipitator Using a Nonmetallic Pre-Charger // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2011.

100. Venkataraman L.D.& C. A Wet Electrostatic Precipitator (WESP) for Soft Nanoparticle Collection // *Aerosol Science and Technology*. – 2012. – Vol. 46. – № 7. – P. 750-759.

101. Chenggang D., Chaolin S., Shiyi G., Qiang J., Weiguo P., Honglei D., Ruitang G. Removal Efficiency of Wet Electrostatic Precipitator for Inhalable Particles of Different Sizes // *Power Equipment*. – 2015.

102. Legendre D., Magnaudet J. The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 368. P. 81-126.

103. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

104. Ji L., Pei J., Liu W. Long-term performance of fibrous ventilation/air-cleaner filters for particle removal // *Building and Environment*. – 2019. – Vol. 160. – № AUG. – P. 106222.

105. Zhu B., Shao J., Wang F., Zeng L., Newton M.A.A., Gong H., Shang S., Xu Y., Zheng Y., Xin B. 3D nanofibrous sponge with curly fibers via electrospinning for

thermally insulating air filter // Separation and Purification Technology. Vol. 380. Article 135537.

106. Hsu, ChangFu Factors Influencing the Effectiveness of In-Room Filtration Units (Portable Air Cleaning Devices) for Controlling Certain Viable Aerosols. – 2016.

107. Hogan C., Phu H.T., Abraham A., Belani K., Andrews A., Marabella I., Olson B., Park Y., Dufresne T. PORTABLE PATIENT ISOLATION SYSTEMS AND METHODS. – 2021.

108. Lee J.H., Rounds M., MCGain F., Schofield R., Skidmore G., Wadlow I., Kevin K., Stevens A., Marshall C., Irving L. Effectiveness of portable air filtration on reducing indoor aerosol transmission: preclinical observational trials // The Journal of hospital infection. – 2022. – Vol. 119. – P. 163-169.

109. Sankhyan S., Witteman J.K., Cohan S., Patel S., Vance M.E. Assessment of PM2.5 concentrations, transport, and mitigation in indoor environments using low-cost air quality monitors and a portable air cleaner // Environmental Science: Atmospheres. – 2022.

110. Klaver Z.M., Crane R.C., Ziemba R.A., Bard R.L., Adar S.D., Brook R.D., Morishita M. Reduction of Outdoor and Indoor PM2.5 Source Contributions via Portable Air Filtration Systems in a Senior Residential Facility in Detroit, Michigan // TOXICS. – 2023. – Vol. 11. – № 12. – P. 1019.

111. Arasa D. Cost-Effective Automatic Portable Air Purifier // Journal of Electrical Systems. – 2024. – Vol. 20. – № 7s. – P. 1131-1138.

112. Ilacqua V. Modeling the Effectiveness of Portable Air Cleaners with Open Windows. // ASHRAE Transactions. – 2024. – Vol. 130. – № 1. – P. 9.

113. Lu F.T., Laumbach R.J., Legard A., Myers N.T., Black K.G., Ohman-Strickland P., Alimokhtari S., de Resende A., Calderón L., Mainelis G., Kipen H.M. Real-World Effectiveness of Portable Air Cleaners in Reducing Home Particulate Matter Concentrations // Aerosol and Air Quality Research. — 2024. — Vol. 24, No. 1. — Article 230202.

114. Xia T., Ranases J., Schmiesing B., Garcia R., Walding A., Demajo R., Schulz A., Batterman S.A. How teacher behaviors and perceptions, air change rates, and portable

air purifiers affect indoor air quality in naturally ventilated schools // *Frontiers in Public Health*. 2024. Vol. 12. Article 1427116.

115. Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А. Способ повышения эффективности удаления вредных веществ от постов плазменной резки // *Строительство и техногенная безопасность*. 2024. № 34 (86). С. 39-43.

116. Шаптала В. В., Хукаленко Е. Е., Северин Н. Н., Гусев Ю. М. Устройства и процессы вентиляции при выполнении электросварочных работ // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2020. № 9. С. 21-29.

117. Месхи Б. Ч., Корончик Д. А., Булыгин Ю. И., Черевань Ю. С., Стрекоз М. Н. Экспериментальные исследования состояния качества воздуха рабочей зоны сварщика при работе в полукрытых пространствах ограниченного объема // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2017. № 1. С. 4–17.

118. Корончик Д. А., Булыгин Ю. И., Рогозин Д. В., Гайденко А. Л., Легконогих А. Н. Методология и принципы поиска решений, обеспечения безопасности работы сварщиков в стеснённых условиях и на труднодоступных объектах // *Вестник Донского гос. техн. ун-та*. 2016. Т. 16. № 3 (86). С. 141–147.

119. Борисов А. А. Распределение сварочного аэрозоля в воздухе арматурного цеха завода ЖБИ // *Альманах современной науки и образования*. 2012. № 7 (62). С. 19–23.

120. Уляшева В. М., Анисимов С. М., Шамколович А. Н. Численное моделирование вентиляционных процессов в сварочном цехе // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 3 (74). С. 118–124.

121. Кожухова Н. А., Трофимчук С. Н., Сайфуллин Т. И. Численное моделирование процессов распространения вредных веществ при проведении сварочных работ в производственном помещении с общеобменной и местной вентиляцией // *Medline.ru. Российский биомедицинский журнал*. 2020. Т. 21. С. 1106–1114.

122. Месхи Б. Ч., Булыгин Ю. И., Легконогих А. Н., Гайденко А. Л. Математическое и компьютерное моделирование формирования параметров производственной среды в целях проектирования и оптимизации систем

вентиляции помещений // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2014. Т. 14. № 2 (77). С. 46–55.

123. Турубаев Р. Р., Шваб А. В. Численное исследование аэродинамики закрученного потока в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 47. С. 87–98.

124. Логачев К.И., Зиганшин А.М., Попов Е.И. и др. Численное моделирование улавливания свободно-конвективного воздушного течения от круглого теплоисточника круглым отсосом-раструбом // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 11 (803). С. 71-84.

125. Джин Х. Исследование устройства для очистки воздуха от сварочного аэрозоля // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 5 (112). С. 67-76.

126. Джин Х. Экспериментальное исследование эффективности нового типа передвижного фильтровентиляционного устройства с водяной ванной // Инновации и инвестиции. 2025. № 3. С. 485-490.

127. Health standard for weld fume in the air of welding shop. T/CWAN 0002-2017. China. <https://www.spc.org.cn/online/9e6290aa5e00f458e0e1ab93ab251b67.html>

128. Rosin P.E., Rammler E. Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. Journal of the Institute of Fuel. Volume 7 (31), 29-36, 1933

129. Liu W., Liang Q., Yao C., Li B., Ji J., Wang X., Luo Y., Huang Y. Comparative study on the dispersion and removal efficiency of indoor aerosol particles under various displacement ventilation modes // Atmospheric Pollution Research. — 2025. — Vol. 16. — No. 2. — P. 102397.

130. Yu. K., Kirichenko, V. A., Drozd, A. V., Gridasov 3D-Modeling of the Distribution of Welding Aerosol Nano-and Microparticles in the Working Area // Nano Hybrids. — 2017. — Vol. 13. — P. 232-238.

131. Antonini J.M., Afshari A., Meighan T.G., Mckinney W., Jackson M., Schwegler-Berry D., Burns D.A., Lebouf R.F., Chen B.T., Shoeb M. Aerosol characterization and pulmonary responses in rats after short-term inhalation of fumes

generated during resistance spot welding of galvanized steel // *Toxicology Reports*. — 2017. — Vol. 4. — P. 123-133.

132. Джин Х., Пономарев Н.С., Сон Я.П., Рогожина Т.С. Численное моделирование системы вентиляции сварочных цехов больших объемов // *Вестник гражданских инженеров*. 2024. № 1 (102). С. 84-94.

133. Пономарев Н.С., Джин Х., Сон Я.П. Численное моделирование системы вентиляции помещений сварочных цехов больших объемов // *Современные проблемы развития Европейского Севера. Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Ухтинский государственный технический университет. Ухта, 2023. С. 188-191.

134. Джин Х., Пономарев Н.С., Гримитлин А.М., Лю Х. Численное моделирование системы общеобменной вентиляции сварочного цеха // *Промышленное и гражданское строительство*. 2026. № 3. С. 77–83.

135. Newton A., Serdar B., Adams K., Dickinson L.M., Koehler K. Lung deposition versus inhalable sampling to estimate body burden of welding fume exposure: A pilot sampler study in stainless steel welders // *Journal of Aerosol Science*. – 2021. – Vol. 153. – P. 105721.

136. Zhao J., Feng Y., Bezerra M., Wang J., Sperry T. Numerical simulation of welding fume lung dosimetry // *Journal of Aerosol Science*. – 2019. – Vol. 135. – P. 113-129.

137. Liu Q., Zhu Z., Hua Y., Guo L. Study on dust control technology and parameters for a coal washing plant screening workshop based on CFD technology of positive-negative pressure dust removal systems // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 448. – P. 120250.

138. Cui P., Chen C., Li B., Yao Y., Luo Y., Huang Y. Diffusion characteristics of re-suspended PM_{2.5} within a radiant floor heating room under various ventilation modes // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 98. – P. 111499.

139. Li C., Wang H. Numerical simulation of welding aerosol diffusion based on plasma flow characteristics // *Environmental Technology & Innovation*. – 2023. – Vol. 31. – P. 103223.

140. Fang C., Zou R., Luo G., Ji Q., Sun R., Hu H., Li X., Yao H. CFD simulation design and optimization of a novel zigzag wave-plate mist eliminator with perforated plate // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 184. – P. 116212.

141. Chen T., Cao S.-J. Numerical study on the integrated effects of supplied air velocity and exhaust velocity on particles removal for industrial buildings // *Energy and Built Environment*. – 2021. – Vol. 2. – № 4. – P. 380-391.

142. Chen F., Yu S.C.M., Lai A.C.K. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40. – № 2. – P. 357-367.

143. Zhao X., Yin Y. Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend // *Building and Environment*. 2024. Vol. 251. Article 111229.

144. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 4th ed. Wiley, 2016.

145. Separator for vacuum cleaner, патент US 7203992B2, 2007.

146. Separator for vacuum cleaner, патент EP 3934502B1, 2020.

147. Установка очистки воздуха: пат. RU 2739406C1 Российская Федерация / Красильников К.Л., Тырцев А.Н., Каменских А.П., Ельшин А.В., Макарова Л.Е.; № 2019133033/19, заявл. 30.09.2019; опубл. 23.12.2020, Бюл. №36.

148. Килин П.И., Килин К.П. *Промышленная вентиляция*. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. 340 с.

149. Ishii M., Hibiki T. *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. 2nd ed. New York: Springer, 2011. 518 p.

150. Bhole M. R., Joshi J. B., Ramkrishna D. CFD simulation of bubble columns incorporating population balance modeling // *Chemical Engineering Science*. 2008. Vol. 63, № 8. P. 2267–2282.

151. Luo H., Svendsen H. F. Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions // *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42, № 5. P. 1225–1233.

152. Prince M. J., Blanch H. W. Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns // *AIChE Journal*. 1990. Vol. 36, № 10. P. 1485–1499. DOI: 10.1002/aic.690361004.

153. Luo J. Y., Gosman A. D. Prediction of impeller-induced flow in mixing vessels using multiple frames of reference // *ICHEME Symposium Series*. 1994. № 136. P. 549–556.

154. Shiea M., Buffo A., Vanni M., Marchisio D. L. Numerical Methods for the Solution of Population Balance Equations Coupled with Computational Fluid Dynamics // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2020. Vol. 11. P. 339–366. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-092319-075814.

155. Yeoh G. H., Cheung C. P., Tu J. *Multiphase Flow Analysis Using Population Balance Modeling: Bubbles, Drops and Particles*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

156. Valdés J.P., Asuaje V., Ratkovich N. Study of an ESP's performance handling liquid-liquid flow and unstable O-W emulsions. Part II: Coupled CFD-PBM modelling // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 198. Article 108227.

157. Rietema K. *The Dynamics of Fine Powders*. — London; New York: Elsevier Applied Science, 1991. — XII, 262 p.

158. Rudinger G. *Fundamentals of Gas-Particle Flow*. — Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. — 142 p. — (Handbook of Powder Technology; Vol. 2).

159. ГОСТ Р ЕН 779–2014. Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2014. — 68 с.

160. Donaldson Company, Inc. *Fume Collectors: High-Performing Weld Fume Extraction* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.donaldson.com/en/products/fume-extractors/> (дата обращения: 20.05.2026)

161. National Development and Reform Commission (NDRC). *Notice on Further Deepening the Market-oriented Reform of Coal-fired Power Generation On-grid Tariff*, 2021.

Приложение А – Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер

ООО «Пекин Хуанвэй Технологии»

Сунь Бинь Сунь Бинь

«17» апреля 2025 г.



внедрения результатов научно-исследовательской работы аспиранта
Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Джин Хэвэй

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на тему «Совершенствование систем вентиляции и пылеулавливания сварочных цехов», выполненной аспирантом Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Джин Хэвэй в 2025 году, приняты к внедрению в производственную деятельность ООО «Пекин Хуанвэй Технологии».

Результаты научно-исследовательской работы использованы при разработке и эксплуатации системы очистки воздуха крупного цеха механической обработки. Техническое решение адаптировано к условиям мобильных сварочных участков и предусматривает использование оборотной воды в качестве рабочей среды.

Внедрение указанных результатов позволило повысить эффективность удаления сварочных аэрозолей, снизить совокупные эксплуатационные расходы и получить положительный инженерно-экономический эффект. Практическое использование результатов подтверждает их научно-практическую значимость и целесообразность дальнейшего применения в производственных помещениях аналогичного типа.

Главный инженер
ООО «Пекин Хуанвэй Технологии»



Сунь Бинь

подпись

Сунь Бинь

Приложение Б – Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер

ООО «Циндиншань Чаоцин Экологические технологии»



Ян Юй

« 21 » ноября 2025 г.

М.П.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы аспиранта
Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Джин Хевэй

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на тему «Совершенствование систем вентиляции и пылеудаления сварочных цехов» выполненной аспирантом Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Джин Хевэй в 2025 году, приняты к внедрению в производственную деятельность ООО «Циндиншань Чаоцин Экологические Технологии».

Результаты научно-исследовательской работы использованы при внедрении передвижного устройства мокрого пылеулавливания в системе очистки воздуха крупного цеха по переработке табака. Техническое решение позволило заменить традиционные мешочные фильтровальные установки и адаптировать систему к условиям эксплуатации предприятия.

Внедрение устройства позволило повысить эффективность улавливания пыли, снизить эксплуатационные затраты и уменьшить риск возникновения пожароопасных ситуаций, что подтверждает положительный инженерно-экономический эффект и практическую значимость полученных результатов.

Главный инженер
ООО «Циндиншань Чаоцин
Экологические Технологии»

М.П.



Ян Юй

подпись

Ян Юй

Приложение В – Акт о практическом использовании научных результатов диссертационной работы в учебном процессе СПбГАСУ

КИТАЙСКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА

Хэнаньский университет городского строительства

Адрес: Китай, провинция Хэнань, г. Пиндиншань, новый городской район,
проспект Лунсян, Хэнаньский университет городского строительства

Тел.: _____ (+86)03752089069 Сайт: www.huuc.edu.cn

УТВЕРЖДАЮ

Декан Института энергетической инженерии
Хэнаньского университета городского строительства

 Лю Хайянь
«20» апреля 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся: составили настоящий акт о том, что научные результаты диссертационной работы Джина Хевэя на тему «Совершенствование систем вентиляции и пылеудаления сварочных цехов» используются в учебном процессе в Институте энергетической инженерии Хэнаньского университета городского строительства.


Результаты диссертационного исследования применяются при проведении лекционных курсов, практических и лабораторных занятий, а также при выполнении курсового проектирования по дисциплинам «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», «Вентиляция», «Промышленная вентиляция и пылеулавливание», «Технологии пылеудаления и очистки воздуха» в рамках подготовки студентов по образовательным программам «Строительная среда и энергетическое применение в зданиях» и «Энергетика и энергетическое машиностроение».

Настоящий акт составлен для представления по месту требования.

Декан Института энергетической инженерии Хэнаньского университета городского строительства(ХУГС)

 Лю Хайянь


Заместитель декана по учебной работе Института энергетической инженерии (ХУГС)

 Сун Яньпин

Заместитель декана по научной работе Института энергетической инженерии (ХУГС)

 Ван Сюйжун

Профессор Института энергетической инженерии(ХУГС)

 Ху Минцзян

Заведующая кафедрой

«Строительная среда и энергетическое применение в зданиях»

 Юй Тинтин

Приложение Г – Акт о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс СПбГАСУ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

24.06.2026 № 2А-02-04

о внедрении научных результатов
 диссертации в образовательный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
 деятельности

С.В. Михайлов

июня 2026 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс

На основании решения Учебно-методической комиссии факультета инженерной экологии и городского хозяйства (Протокол от 19.06.2026 №9) научные результаты диссертации «Совершенствование систем вентиляции и пылеудаления сварочных цехов» на соискание ученой степени кандидата технических наук Джина Хевэя, аспиранта кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, в виде численных моделей систем вентиляции и пылеудаления внедрены в образовательный процесс обучающихся по основной профессиональной образовательной программе 08.04.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция; по основной профессиональной образовательной программе 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника.

Председатель
 учебно-методической комиссии

Д.В. Ульрих

Секретарь
 учебно-методической комиссии

М.Н. Брюхов

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

Е.Б. Александрова

Начальник УНР

М.В. Аверина

Приложение Д – Сравнение сухих механических пылеуловителей

Название пылеуловителя	Механизм пылеуловителя	Основные характеристики пылеуловителя	Размер частиц пыли, мкм	Сопротивление, Па	Эффективность пылеудаления, %
Гравитационный пылеуловитель	Благодаря гравитации частицы пыли оседают естественным образом и отделяются от газа.	Малая потеря давления; может работать только с частицами более 50 мкм, большой размер оборудования	50~100	50~130	60~75
Инерционный пылеуловитель	Частицы пыли в потоке запыленного газа под действием инерционного столкновения, под действием силы инерции, создаваемой их собственной гравитацией, достигают разделения пыли и газа.	Может обрабатывать высокотемпературные запыленные газы с низким сопротивлением; низкая скорость отделения пыли от газа	50~100	300~800	65~70
Циклонный пылеуловитель	Центробежная сила, создаваемая вращающимся потоком воздуха, отделяет пыль и газ	Может обрабатывать при высокой температуре и давлении, коррозионно-активные газы; не может удалять мелкие частицы.	20~50	800~1500	70~85
Рукавный фильтр	Пыль отделяется через волокнистую фильтровальную ткань благодаря диффузии, инерции, столкновению, удержанию и другим факторам.	Простая структура, может удалить пыли с высокой концентрацией; значительная потеря давления, трудно очистить поверхность от пыли, потери фильтрующего материала.	0,5~20	1000~1500	95~99
Электростатический пылеуловитель	Частицы пыли ионизируются, а заряженные ионы адсорбируются на электродной пластине для разделения воздуха и пыли.	Высокая эффективность удаления пыли, может адсорбировать мелкие частицы пыли, низкое сопротивление, может работать с газом высокой температуры; но оборудование крупногабаритное, высокая стоимость, сложная структура оборудования, может отбирать только определенную пыль	0,5~20	100~200	95~99
Пылеуловитель пористого (гранулированного) слоя	Пыль прикрепляется к частицам фильтрующего материала и поверхности частиц пыли.	При обработке агрессивного запыленного газа фильтрующий материал может использоваться многократно, эффективность удаления пыли высокая, но конструкция сложная, неудобно очищать пыль с поверхности.	0,5~20	100~2000	98~99

Приложение Е – Сравнение мокрых пылеуловителей

Название	Преимущество	Недостатки	Потребление воды л/м ³	Размер частиц, мкм	Сопротивление, Па	Эффективность, %
Пылеуловитель гравитационный	Простая конструкция, низкое сопротивление, удобство эксплуатации	Большой размер оборудования и расход воды, низкая эффективность пылеудаления	0,3~1,5	50~100	100~250	70~90
Пылеуловитель вертикальный с водяной пленкой (циклон)	Эффективно обрабатывать при высокой концентрации и скорости потока, низкое потребление воды	Неправильный контроль уровня воды приводит к накоплению пыли, шлам засоряет трубопровод	0,1~0,3	5~10	800~1200	90~95
Пылеуловитель с водяной ванной	Компактная структура, небольшая площадь, простая установка	Не используется для очистки газов, трудно контактирующих с жидкостями	0,2~0,3	5~50	400~700	80~95
Импульсный пылеуловитель	Легко обрабатывать газы с высокой влажностью и содержанием пыли, малая занимаемая площадь	Высокий расход металла, высокое сопротивление, высокая стоимость, легко вызывает вторичное загрязнение.	0,1~0,3	5~100	1000~1600	90~99
Пылеуловитель Вентури	Высокая эффективность, удобство эксплуатации и ремонта	Серьезный износ горловины, высокая стоимость	0,3~1,5	0,1~100	600~5000	90~98
Пылеуловитель с водяной пленкой и вибрационной струной	Низкое сопротивление, малый размер, легкий вес, удобство обслуживания	Значительный расход воды, низкая эффективность пленкообразования, высокая мощность, низкая эффективность пылеулавливания	0,5~2	1~50	300~500	85~90