


*На правах рукописи*



**ДЖИН Хевэй**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ  
ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕУДАЛЕНИЯ  
СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

**Научный руководитель:** **Пономарев Николай Степанович,**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент.

**Официальные оппоненты:** **Зайцев Олег Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет», кафедра  
инфраструктурных теплоэнергетических  
систем, заведующий;

**Попов Евгений Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова», кафедра  
теплогазоснабжения и вентиляции, доцент.

**Ведущая организация:** **ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет».**

Защита диссертации состоится «29» сентября 2026 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/dzhin-hevey>

Автореферат разослан «16» июля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



В. А. Пухкал

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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. Шапгала, 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 воздухо-распределителей 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 воздухо-распределителя для обеспечения нормативных требований к воздуху рабочей зоны.

### **Задачи исследования:**

- выполнить анализ технических решений устройства систем вентиляции в сварочных цехах, выявить направления исследований;
- провести натурный эксперимент для определения дисперсного состава сварочных аэрозолей на рабочих местах сварщиков при использовании общеобменной вентиляции;
- усовершенствовать математическую модель распределения твердых частиц сварочного аэрозоля в сварочном цехе при использовании новой конструкции воздухо-распределителя общеобменной системы приточной вентиляции;
- разработать конструкции высокоэффективных передвижных местных устройств очистки воздуха и лабораторный стенд для исследования эффективности предложенных устройств;

- усовершенствовать математическую модель очистки воздуха в местном передвижном агрегате;
- разработать рекомендации по проектированию систем вентиляции сварочных цехов.

**Объектом исследования** являются система вентиляции сварочного цеха.

**Предметом исследования** являются процессы взаимодействия приточных струй со сварочным аэрозолем и улавливания взвешенных частиц.

**Методология и методы исследования.** 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 работы 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 конструкции 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, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, в практику компаний ООО «Пекин Хуанвэй Технологии», ООО «Пиндиншань Чаоцин Экологические Технологии».

### **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.

**Степень достоверности и апробация 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.

Основные результаты исследования представлены на научных, научно-технических и научно-практических конференциях: Национальной (всероссийской) конференции «Инженерные системы и городское хозяйство» (СПбГАСУ, 2023 г.); Всероссийской конференции «Современные проблемы развития Европейского Севера» (УГТУ, 2023 г.); Национальной (всероссийской) конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (СПбГАСУ, 2024 г.); Национальном (всероссийском) симпозиуме «Численное моделирование в климатических системах» (СПбГАСУ, 2025 г.); LXXIX Международной конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика»

(СПбГАСУ, 2025); XIX Международной конференции «Актуальные вопросы строительства и архитектуры» (Сибстрин, г. Новосибирск, 2026 г.).

**Результаты диссертационного исследования** внедрены в ООО «Пекин Хуанвэй Технологии» и ООО «Пиндиншань Чаоцин Экологические Технологии». Организациями представлены акты о внедрении научных результатов.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 4 печатных работах (2,13 п.л) в научных журналах, 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 страницах приложений, содержит 10 таблиц, 81 рисунок и 53 формулы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования; выявлена степень разработанности темы; определены цель и задачи, предмет и объект исследования; сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов; приведены сведения об апробации и публикациях в журналах ВАК.

**В первой главе** представлен обзор научных и технических достижений в области очистки воздушной среды сварочных цехов. Рассмотрены особенности технологического процесса сварки, характеристики выделяющихся вредных веществ, взаимодействие сварочного аэрозоля с воздушными и тепловыми потоками, а также существующие решения в области общеобменной и местной вентиляции сварочных цехов.

**Во второй главе** определены физические характеристики сварочного аэрозоля; выполнен анализ факторов, влияющих на его распространение и осаждение; разработана численная модель воздухораспределителя с вращающимися решётками; приведены результаты исследования эффективности систем общеобменной вентиляции в сварочном цехе с учетом влияния скорости движения воздуха, диаметра и пористости частиц на процесс их осаждения.

**В третьей главе** представлены результаты исследований местной системы вытяжной вентиляции. Предложены конструкции передвижных установок мокрого пылеулавливания, выполнено численное исследование эффективности улавливания сварочного аэрозоля, представлено планирование лабораторных испытаний, проведён анализ экспериментальных данных для базовой и усовершенствованной пылеулавливающих установок.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования воздушного режима сварочного цеха с предлагаемыми усовершенствованиями систем вентиляции. Разработана численная модель воздушного режима сварочного цеха. В натуральных условиях исследовано влияние положения сварочного факела и защитного экрана на эффективность улавливания сварочного

аэрозоля. Выполнена технико-экономическая оценка эффективности предложенных решений.

**В заключении** представлены основные выводы и перспективы дальнейших исследований.

## II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

### 1. Численная модель воздухораспределителя с вращающимися решетками и зависимости концентрации РМ10 в сварочном аэрозоле при различных положениях вращающихся решеток.

Для разработки численной модели предварительно выполнены натурные исследования в сварочном цехе учебно-производственного центра металлообработки Хэнаньского университета городского строительства (рисунок 1) без учета влияния вентиляции. Использован оптический аэрозольный спектрометр для измерений концентрации частиц размерами  $0,25 \div 32$  мкм. Результаты представлены: на рисунке 2 в виде гистограммы распределения данных по частицам с вышеуказанными размерами, а также – формулы (1). Максимум распределения концентрации соответствует частицам размером порядка 0,3 мкм, основной объем приходится на частицы размером  $< 1$  мкм (PM1) – 97,0 %.

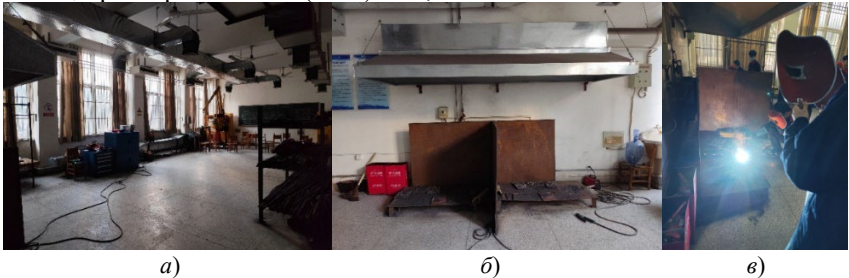


Рисунок 1 – Место проведения натурных исследований характеристик сварочного аэрозоля: *а* – общий вид сварочного цеха; *б* – вид сварочного поста; *в* – процесс сварки

Концентрация РМ10 достигала  $4672 \text{ мкг/м}^3$  и превышала допустимый уровень для сварочного аэрозоля. Средний диаметр частиц  $d_{50} = 0,328$  мкм с параметром  $n = 0,963$ . Размерное распределение представлено на рисунке 3 и описано выражением

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

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.

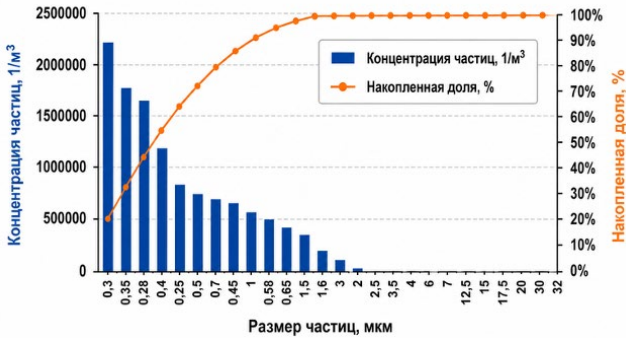


Рисунок 2 – Распределение концентрации твердых частиц сварочного аэрозоля по их размерам

Для оценки естественного осаждения сварочного аэрозоля после прекращения сварки проводился непрерывный мониторинг концентрации частиц различных размеров. Установлено, что частицы размером 2,5–10 мкм оседают сравнительно быстро: их концентрация снижается более чем на 80%. Для частиц 0,5–1 мкм снижение составляет около 50 %, тогда как для частиц размером 0,25 мкм — около 20% (рисунок 3). Следовательно, мелкодисперсные частицы длительно сохраняются во взвешенном состоянии и представляют наибольшую опасность для работающих.

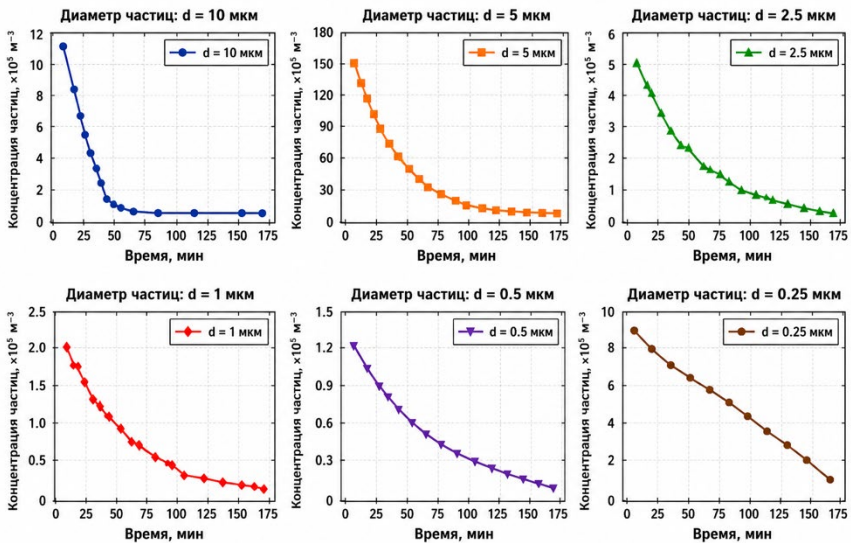


Рисунок 3 – Зависимость концентрации твердых частиц от времени после прекращения сварки

Для разработки решений общеобменной вентиляции рассмотрен крупногабаритный сварочный цех судостроительного предприятия размером  $216 \times 66 \times 13,7$  м, в котором размещены 80 сварочных постов с изменяющимся расположением рабочих мест (рисунок 4). С учётом модульной структуры цеха расчётная область была представлена в виде повторяющихся модулей с периодическими граничными условиями.

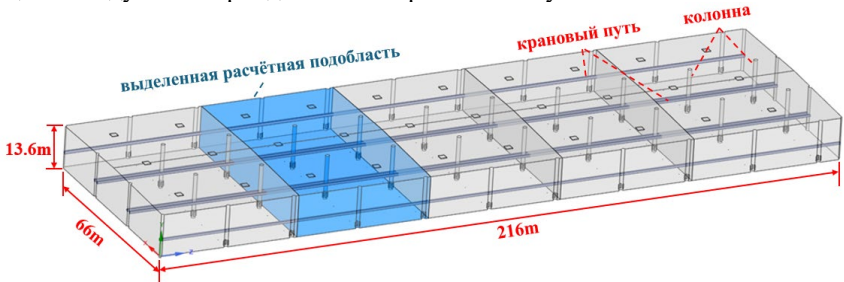


Рисунок 4 – К моделированию общеобменной вентиляции сварочного цеха

Диффузия и осаждение сварочного аэрозоля в воздушном потоке определяются влиянием скорости подачи воздуха, размера и пористости частиц. Для оценки влияния скорости подачи существующих воздухораспределителей рассмотрены значения 5, 10, 15 и 20 м/с.

Для повышения эффективности удаления сварочного аэрозоля предложен воздухораспределитель с вращающимися решётками, конструкция представлена на рисунках 5 и 6 для четырех положений при одном цикле вращения.

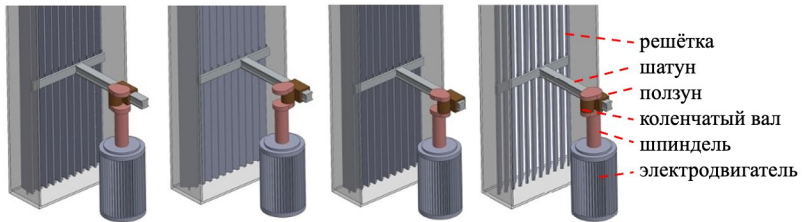


Рисунок 5 – Положения воздухораспределителя с четырёхсторонним выпуском

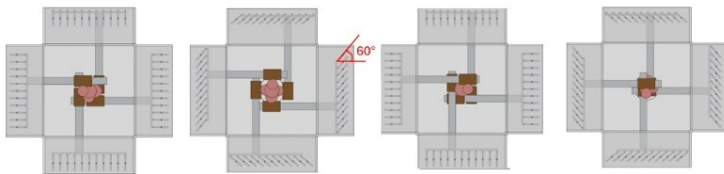


Рисунок 6 – Движение воздухораспределителя с четырёхсторонним выпуском (вид сверху)

Устройство создаёт определенное положение воздухораспределительных решёток, которое соответствует также определенному направлению движения приточного воздуха во времени. Различное конструктивное исполнение позволяет получить одно-, двух- и четырёх стороннее направление приточной струи. В данном исследовании использован вариант с четырёхсторонним направлением подачи приточного воздуха.

Для исследования эффективности общеобменной вентиляции выполнено нестационарное CFD-моделирование процессов распространения и удаления сварочного аэрозоля. Для сокращения времени вычислительного процесса выполнено изменение геометрической модели воздухораспределителя с вращающейся решеткой на эквивалентное отверстие без решетки с тем же расходом приточного воздуха. Вращение расчетной сетки для имитации определенного направления вектора скорости выполнено в программе FLUENT с помощью метода разложения вектора по ортогональным осям. Соответствующие условия записаны в виде макросов с использованием уравнений:

$$\begin{aligned} V &= V_x + V_y; \\ V_x &= V \cdot |\sin\alpha|; \\ V_y &= V \cdot |\cos\alpha|, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол поворота расчетной сетки, в диапазоне  $30^\circ \div 150^\circ$ ; угол  $\alpha$  определен следующим выражением  $\alpha = \langle \text{flow-time} \rangle \cdot \pi/60$ .

Для снижения концентрации PM10 на 45 % необходимо около 120 с. В дальнейших исследованиях принята скорость приточного воздуха 10 м/с, учитывая условия выполнения сварочных работ, показатели энергопотребления и эффективность улавливания.

Для оценки влияния дисперсного состава рассмотрены фракции PM50, PM20, PM10, PM5, PM2,5 и PM1. Установлено, что частицы PM50 практически полностью оседают в течение 5 с, а концентрация PM20 снижается на 80 % за 15 с. Для частиц размером менее 10 мкм влияние силы тяжести незначительно: за 30 с удаляется около 30 % PM10 и не более 15 % частиц PM5, PM2.5 и PM1. Следовательно, наиболее мелкие фракции должны удаляться преимущественно с использованием местных вытяжных систем.

Для оценки влияния пористости рассмотрены частицы PM10 с пористостью 75 %, 50 %, 25 % и 0 %. Результаты показали, что данный фактор оказывает ограниченное влияние: различие между случаями с пористостью 75 % и 0 % не превышает 10 %. Получены следующие показатели влияния: скорость подачи воздуха — 36,7 %, размер частиц — 35,4 %, пористость частиц — 15,9 %. Относительная значимость факторов может быть представлена в виде:

$$I_u > I_{d_p} > I_\epsilon. \quad (3)$$

Полученный результат показывает, что при проектировании вентиляции сварочных цехов первоочередное внимание следует уделять оптимизации скорости подачи воздуха, организации воздушных потоков и удалению мелкодисперсных фракций сварочного аэрозоля.

С учётом особенностей крупногабаритного сварочного цеха и изменяющегося расположения сварочных постов разработаны три схемы вентиляции (таблица 1), включая традиционную систему типа push-pull (рисунок 7а) и новую систему с воздухораспределителями с вращающимися решётками (рисунок 7б).

Таблица 1 – 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 м³/ч	129 600 м³/ч	129 600 м³/ч
Кратность воздухообмена	3,6 ч <sup>-1</sup>	3,6 ч <sup>-1</sup>	3,6 ч <sup>-1</sup>

Результаты моделирования показали, что схема «подача сверху – вытяжка снизу» приводит к образованию зон с повышенными скоростями воздуха и областей со стойким превышением допустимой концентрации сварочного аэрозоля. Схема «подача снизу – вытяжка сверху» способствует формированию восходящего потока, однако при фиксированном направлении подачи воздуха возникают неравномерное поле скоростей и застойные зоны, в которых загрязнения удаляются недостаточно эффективно.

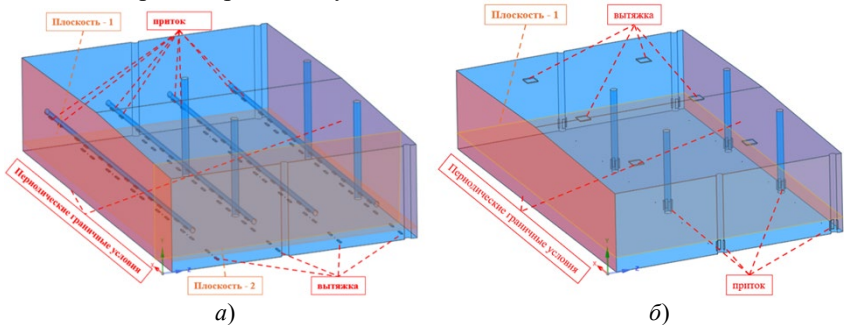


Рисунок 7 – Схема размещения системы вентиляции: а – при схеме организации воздухообмена сверху-вниз; б – снизу-вверх

При использовании воздухораспределителя с вращающимися решётками получены наилучшие результаты. Периодическое изменение направления приточных струй позволяет эффективно устранять застойные зоны

и обеспечивать более равномерное удаление сварочного аэрозоля из рабочей зоны. Соответствующая структура воздушного потока представлена на рисунке 8б, тогда как для традиционной системы с фиксированным направлением подачи воздуха поле скоростей показано на рисунке 8а.

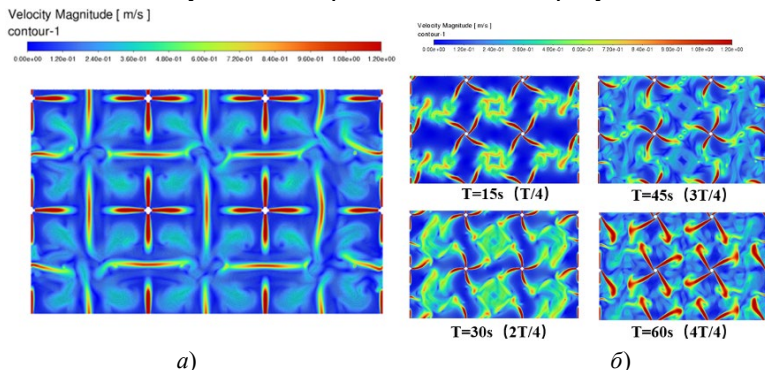


Рисунок 8 – Поле скорости в рабочей зоне помещения при использовании:  
*a* – неподвижной решетки; *б* – вращающейся решетки

Результаты численного моделирования воздушного режима помещения после окончания сварки показали, что при использовании воздухораспределителя с вращающимися решётками концентрация аэрозоля через 120 с практически установилась ниже ПДК на большей части помещения, а через 240 с концентрация аэрозоля ниже ПДК во всём объёме цеха (рисунок 9б).

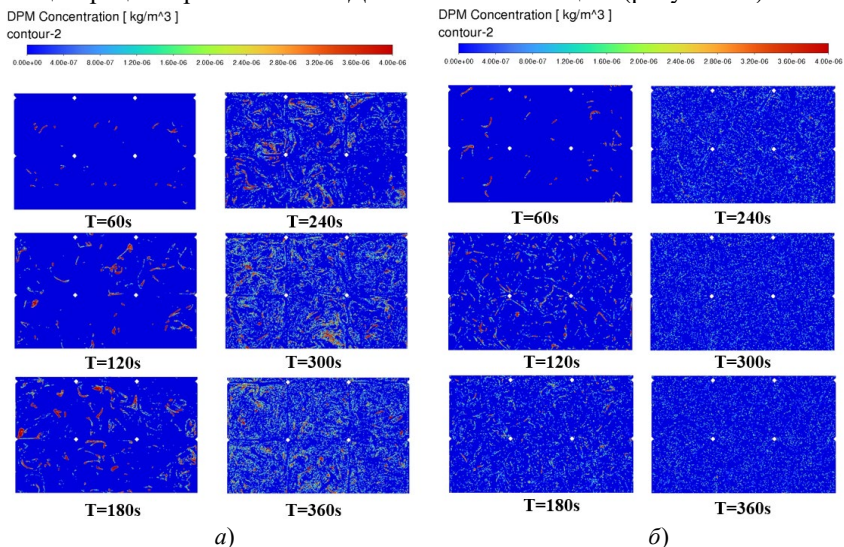


Рисунок 9 – Поле концентрации аэрозоля в рабочей зоне помещения при использовании: *a* – неподвижной решетки; *б* – вращающейся решетки

При сравнении результатов моделирования с использованием традиционной системы с однонаправленным способом подачи воздуха отмечено превышение ПДК примерно на 30% площади рабочей зоны через 360 с после окончания сварки (рисунок 9а).

Таким образом, повышение эффективности общеобменной вентиляции может быть достигнуто при использовании предлагаемой схемы (рисунок 7б) с использованием воздухораспределителей с вращающимися решётками.

Кроме того, установлено, что увеличение скорости подачи воздуха действительно сокращает время очистки воздуха помещения, однако сопровождается существенным ростом энергозатрат. Поэтому по сравнению с простым увеличением расхода воздуха применение воздухораспределителей с изменяемым направлением подачи является более эффективным и экономически целесообразным способом интенсификации воздухообмена.

## 2. Численная модель процесса улавливания сварочного аэрозоля в новой передвижной фильтровентиляционной установке.

В настоящее время для локального удаления сварочного аэрозоля широко применяются передвижные фильтровентиляционные установки. Несмотря на мобильность и удобство эксплуатации, их применение сопровождается снижением эффективности очистки по мере загрязнения фильтров, ограниченной способностью улавливать мелкодисперсные частицы PM1–PM2,5 и значительными затратами на замену или регенерацию фильтрующих элементов.

Для повышения эффективности очистки предложены четыре варианта конструкции передвижных установок мокрого пылеулавливания с водяной ванной:

- базовая конструкция;
- дополнительный элемент – однослойная металлическая сетка;
- дополнительный элемент – двухслойная металлическая сетка (рисунок 10);

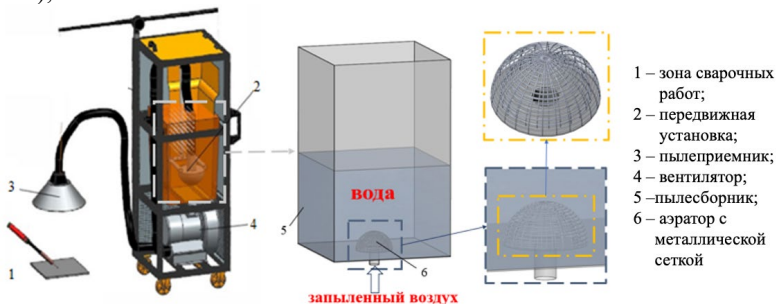


Рисунок 10 – Схема конструкции водяного пылесборника с аэратором

– дополнительные элементы – две лопасти для перемешивания (рисунки 11 и 12).

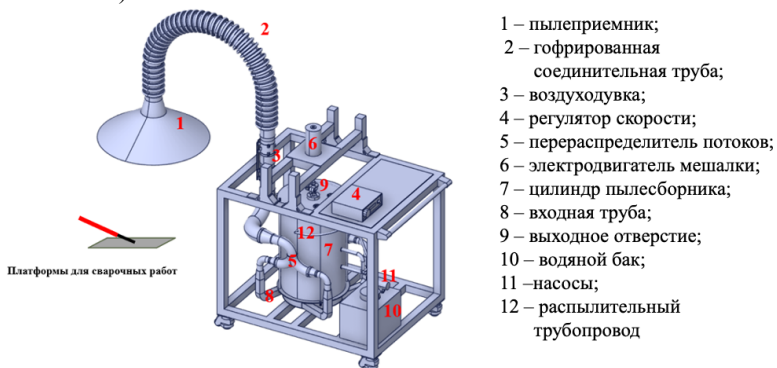


Рисунок 11 – Принципиальная схема экспериментального оборудования с водяной баней и системой перемешивания



Рисунок 12 – Схема конструкции пылеулавливающего цилиндра

Принцип работы основан на пропускании загрязнённого воздуха через жидкую среду. В процессе движения газового потока через воду частицы сварочного аэрозоля захватываются жидкостью и удаляются из воздуха. Дополнительное диспергирование пузырьков газа или капель жидкости позволяет увеличить межфазную поверхность контакта и повысить эффективность очистки.

В качестве основного критерия эффективности выбрана удельная межфазная площадь контакта газ–жидкость, определяющая интенсивность процессов улавливания мелкодисперсных частиц. Для исследования газожидкостного взаимодействия разработана CFD-модель, основанная на

сочетании эйлеровой многофазной модели и модели баланса популяций (РВМ). Модель позволяет учитывать процессы дробления и коалесценции пузырьков и определять пространственно-временное распределение межфазной поверхности в аппарате.

Для оценки эффективности конструктивных решений рассмотрены представленные выше четыре варианта водяного пылеуловителя. В четвертом варианте установка дополнена сеткой между лопастями перемешивания.

Основной принцип работы установки, представленной на рисунке 13, заключается во введении запылённого газового потока в жидкую рабочую среду (воду) с последующей интенсификацией процесса дробления пузырьков различными способами. Это позволяет значительно увеличить площадь контакта между газовой и жидкой фазами, повысить эффективность улавливания и поглощения твёрдых частиц жидкостью и, как следствие, обеспечить очистку воздуха.

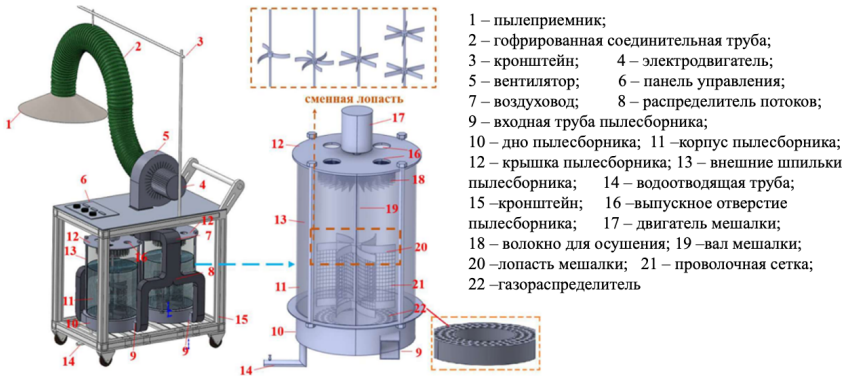


Рисунок 13 – Конструкция новой передвижной водяной пылеулавливающей установки с перемешивающими лопастями

Процесс работы установки осуществляется следующим образом.

Запылённый газ через пылеприемник, гофрированную трубу, вентилятор и воздухопровод поступает в два одинаковых пылесборника, что повышает производительность системы. Пылесборник состоит из дна, корпуса и крышки.

В нижней части расположен газораспределитель с отверстиями 5 мм, формирующий пузырьки и подающий их в жидкую среду для барботажной очистки. В средней части установлен вал мешалки с двумя лопастями, дробящими пузырьки и усиливающими массоперенос. Над верхней лопастью, ниже осушающего волокна, размещена система орошения. Между лопастями может быть установлена проволочная сетка, увеличивающая межфазную поверхность.

В верхней части размещено осушающее волокно, вращающееся с валом и отделяющее капли жидкости. Очищенный воздух выводится через выпускное отверстие в крышке пылесборника.

На рисунке 14 представлены результаты численного моделирования фильтровентиляционной установки с применением перемешивающих лопастей для интенсификации дробления газовых пузырьков (вариант 4).

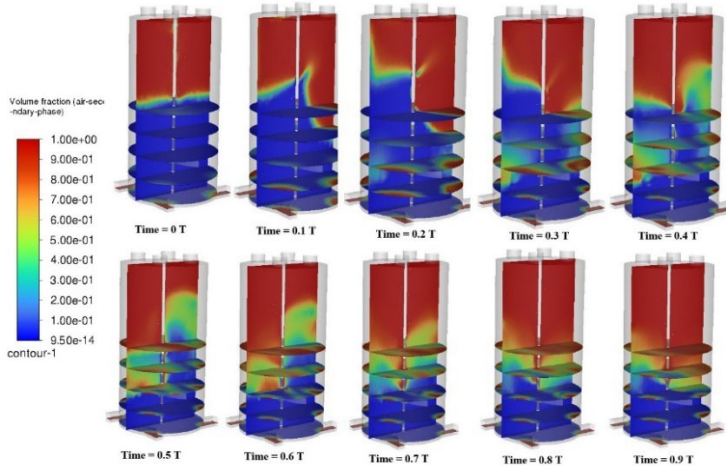


Рисунок 14 – Процесс движения газа в фильтровентиляционной установке с перемешивающими лопастями

Вращение лопастей способствует закручиванию потока воды и газа при движении вверх, их интенсивному перемешиванию и увеличению площади контакта газовой и жидкой фаз.

### 3. Экспериментальные зависимости площади контакта сварочного аэрозоля и воды для различных способов подачи и распределения воды в новой передвижной фильтровентиляционной установке.

Расчёты показали, что площадь контакта газа и жидкости составляет  $0,25 \text{ м}^2$  для базовой конструкции,  $0,38 \text{ м}^2$  – при использовании однослойной сетки,  $0,50 \text{ м}^2$  – при двухслойной сетке и  $1,85 \text{ м}^2$  – при применении лопастей перемешивания с сеткой. Таким образом, вариант с лопастями перемешивания обеспечивает наибольшее увеличение площади газожидкостного контакта и выбран в качестве наиболее эффективного конструктивного решения (рисунок 15).

Для описания изменения площади контакта газовой и жидкой фаз во времени использована эмпирическая модель насыщенного роста:

$$S(t) = S_0 + (S_\infty - S_0) \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n\right) \right], \quad (4)$$

где  $S(t)$  – площадь контакта газовой и жидкой фаз в момент времени  $t$ ;  $S_0$  – начальное значение площади контакта;  $S_\infty$  – предельное или установившееся значение площади контакта;  $\tau$  – характерное время выхода процесса на установившийся режим;  $n$  – эмпирический показатель формы кривой;  $t$  – время, с.

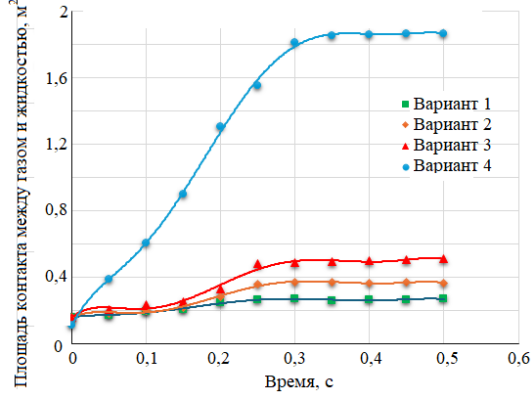


Рисунок 15 – Изменение площади контакта между газом и жидкостью во времени

В таблице 2 приведены сводные параметры аппроксимации изменения площади контакта между газом и жидкостью во времени для четырех вариантов конструкции водяной пылеулавливающей установки.

Таблица 2 – Сводные параметры аппроксимации

Вариант	$S_0$	$S_\infty$	$\tau$ , с	$n$	$R^2$
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

#### 4. Экспериментальные зависимости эффективности пылеудаления для предлагаемых способов подачи воды от скорости на входе и частоты вращения мешалки.

На основе результатов численного моделирования разработана экспериментальная лабораторная установка с высокоэффективным передвижным фильтровентиляционным агрегатом мокрого типа с различными способами распределения воды. Установка, представленная на рисунке 16, предназначена для локального улавливания сварочного аэрозоля непосредственно в зоне его образования и последующей очистки загрязнённого воздуха в водяной ванне с интенсификацией газожидкостного контакта.

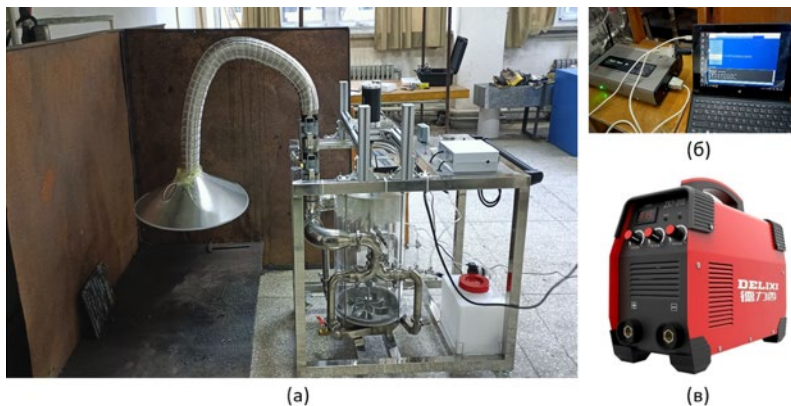
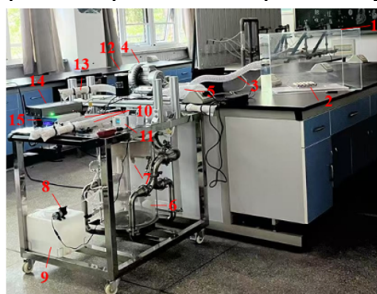


Рисунок 16 – Экспериментальная установка (а);  
портативный лазерный пылемер GRIMM 11-D (б); сварочный аппарат (в)

Для экспериментальной оценки эффективности работы установки исследовалось влияние скорости входящего воздушного потока, частоты вращения мешалки, дисперсного состава частиц и режима подачи воды (рисунок 17). Установлено, что без орошения увеличение частоты вращения мешалки повышает эффективность пылеудаления за счёт более интенсивного дробления газовых пузырьков, диспергирования жидкости и увеличения межфазной поверхности контакта. В то же время рост скорости воздушного потока снижает эффективность очистки вследствие уменьшения времени пребывания аэрозоля внутри аппарата (рисунок 18).



- 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, соединенный со спектрометром размеров аэрозольных частиц

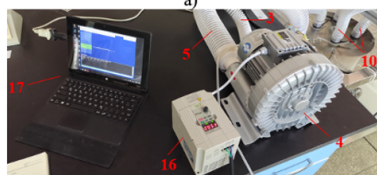


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки для исследования эффективности пылеулавливания с использованием водяной ванны и орошения

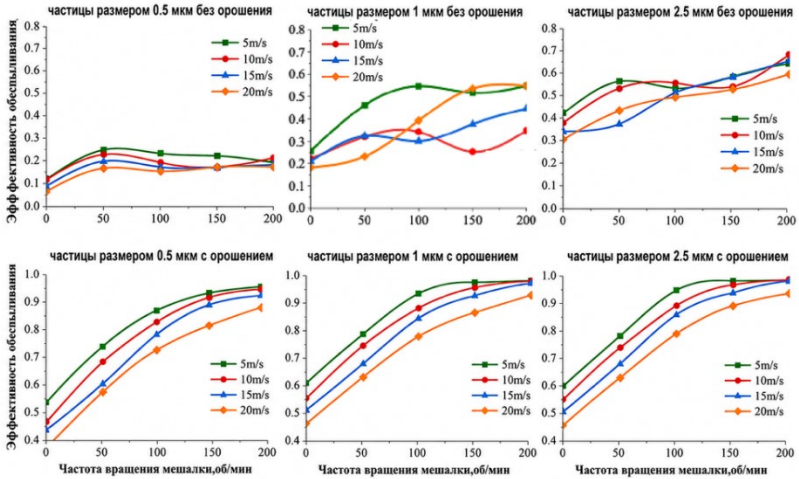


Рисунок 18 – Зависимости эффективности пылеулавливания от частоты вращения мешалки и скорости потока воздуха при выключенной и включенной системе орошения

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

$$\eta = 1 - \exp \left\{ -0,642 \cdot \frac{d_p^{0,77}}{v^{0,20}} \cdot \left( \frac{n + 18,7}{100} \right)^{0,32} \right\}, \quad (5)$$

где  $\eta$  – 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:

$$\eta = 1 - \exp \left( -0,780 \cdot \frac{d_p^{0,176}}{v^{0,316}} \cdot \left( \frac{n + 147}{100} \right)^{1,77} \right). \quad (6)$$

Для оценки практической применимости предложенного решения выполнено технико-экономическое сопоставление систем вентиляции и очистки воздуха в крупном сварочном цехе. Традиционная система общеобменной вентиляции с постоянным расходом воздуха вследствие несоответствия нормативам концентрации аэрозольных частиц исключена из

основного сравнения; поэтому далее рассматриваются две технически сопоставимые схемы с изменяющимся направлением подачи воздуха: с рукавной фильтровальной очисткой и комбинированной мокрой очисткой (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнительная технико-экономическая оценка вариантов вентиляции и очистки воздуха

Показатель	Рукавная фильтровальная очистка	Комбинированная мокрая очистка
Совокупные эксплуатационные затраты, млн ¥/год	1,703	1,397
Дополнительные первоначальные инвестиции по сравнению с рукавной фильтровальной очисткой, млн ¥	–	0,472
Расчётный срок окупаемости дополнительных инвестиций, лет	–	1,65

Несмотря на несколько большее энергопотребление, схема с комбинированной мокрой очисткой снижает совокупные эксплуатационные затраты за счёт отказа от фильтровальных рукавов, их замены, обслуживания и утилизации. Дополнительные инвестиции окупаются примерно за 1,65 года, что подтверждает технико-экономическую целесообразность предложенного решения и его преимущество в защите работников от сварочного аэрозоля.

### **III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ**

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 установок, 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 PM2,5 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.

#### IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

##### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Джин Х.** Численное моделирование системы вентиляции сварочных цехов больших объемов / Х. Джин, Н.С. Пономарев, Я.П. Сон, Т.С. Рождина // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 1 (102). – С. 84–94.
2. **Джин Х.** Экспериментальное исследование эффективности нового типа передвижного фильтровентиляционного устройства с водяной ванной / Х. Джин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 3. – С. 485–490.
3. **Джин Х.** Исследование устройства для очистки воздуха от сварочного аэрозоля / Х. Джин // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 5 (112). – С. 67–76.
4. **Джин Х.** Численное моделирование системы общеобменной вентиляции сварочного цеха / Х. Джин, Н.С. Пономарев, А.М. Гримитлин, Х. Лю // Промышленное и гражданское строительство. 2026. № 3. С. 77–83.

##### Доклады и материалы конференций:

5. **Джин Х.** Имитационное исследование способности систем вентиляции удалять пыль в высоких и больших сварочных цехах. / Х. Джин // Национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Инженерные системы и городское хозяйство». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2023.
6. **Джин Х.** Численное моделирование системы вентиляции помещений сварочных цехов больших объемов / Х. Джин, Н.С. Пономарев // Современные проблемы развития Европейского Севера. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Ухтинский государственный технический университет. Ухта, 2023. С. 188-191.
7. **Джин Х.** Экспериментальное исследование гранулометрических характеристик сварочного дыма / Х. Джин, Н.С. Пономарев // Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2024.
8. **Джин Х.** Проектирование конструкции передвижного пылеуловителя с водяной баней на основе методов CFD / Х. Джин // Национальный (всероссийский) симпозиум «Численное моделирование в климатических системах». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2025.
9. **Джин Х.** Исследование устройства для очистки воздуха от сварочного аэрозоля / Х. Джин, Н.С. Пономарев, А.М. Гримитлин, Х. Лю // LXXIX Международная научно-практическая конференция «Архитектура».

Строительство. Транспорт. Экономика». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2025.

10. **Джин Х.** Исследование эффективности очистки воздуха крупного сварочного цеха с применением фильтровентиляционного агрегата / Х. Джин, Н.С. Пономарев // XIX Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства и архитектуры». Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск, 2026.

-----  
Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 06.07.2026. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 63.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А