

На правах рукописи



СИВАЧЕНКО ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ
СИСТЕМ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

Научный руководитель

Зайцев Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кочев Алексей Геннадьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Теплогазо-
снабжение» ФГБОУ ВО
«Нижегородский государственный
архитектурно-строительный
университет»

Боровков Дмитрий Павлович

доктор технических наук,
заместитель директора по науке
ООО «Проектно-технологическое
бюро проектно-строительного
объединения Волгоградгражданстрой»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет»**

Защита состоится «28» марта 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ГУК 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Sivachenko

Автореферат разослан «__» _____ 202__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Последнее десятилетие отмечается ростом производства на отечественных предприятиях, использующих различные технологии обработки металлов. Это обусловлено развитием таких отраслей как ракетостроение, судостроение, космическая отрасль, отрасли военно-промышленного комплекса, автомобилестроение, а также спросом в таких секторах как ЖКХ. Для целей производств при изготовлении различных элементов, деталей, изделий на предприятиях различных отраслей широкое распространение получила плазменная резка металла.

В Российской Федерации за 2013-2017 гг. было увеличено производство металлорежущих станков с 2 928 до 4 495 штук при этом около 1,8-2 тыс. - станки плазменной резки. При этом для локализации и удаления вредных выбросов от плазменной резки применяется широкая номенклатура различных вытяжных устройств, которые отличаются низкой эффективностью и значительными объемами удаляемого воздуха. Средний объем удаляемого воздуха для таких систем варьируется в диапазоне 5000-7000 м³/ч.

Плазменная резка является одним из эффективных, экономичных и востребованных способов обработки металлов, применяемых в промышленности, целесообразна в широком диапазоне номенклатуры обрабатываемых металлов - толщин и состава, существенно снижает количество разного рода отходов и при этом ускоряет, и упрощает саму процедуру изготовления изделий из различных типов металлов.

Вместе с тем важным усложняющим фактором является подход "вентиляция для плазменной резки", при этом подходе происходит интеграция вспомогательных систем в основное оборудование, что не всегда позволяет качественно решить поставленные задачи по улучшению условий труда.

Таким образом, существует значительный потенциал для совершенствования устройств локальной вытяжной вентиляции, предназначенных для снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду и поддержание требуемых параметров микроклимата путем совершенствования средств локализации, удаления вредностей от нестационарных мест плазменной резки металлов, улучшения качества воздушной среды на рабочих местах и снижения энергетических затрат.

Степень разработанности темы исследования.

Изучению течений в спектрах действия местных отсосов, а также их совершенствованию посвящены труды Аверковой О.А., Батурина В.В., Гримитлина А.М., Дацюк Т.А., Зайцева О.Н., Зиганшина А.М., Логачева, К.И., Посохина В.Н., Талиева В.Н., Уварова В.А., Уляшевой В.М. и многих других, однако в настоящее время отсутствуют исследования, посвященные локализации и удалению вредностей от высокотемпературных гетерогенных струй, образующихся под обрабатываемой поверхностью.

Объектом исследования являются места плазменной резки металлов.

Предметом исследования являются газодинамические и термодинамические процессы удаления вредностей при плазменной резке металлов.

Гипотеза исследования заключается в предположении об увеличении спектра всасывания путем большего раскрытия угла диффузора.

Целью исследования является совершенствование средств локализации и удаления вредных отложений от стационарных мест плазменной резки металлов путем позиционирования коаксиального отсоса под обрабатываемой поверхностью.

Задачи исследования:

- на основании обзора литературных источников и систематизации, существующих в сварочном производстве способов и средств локализации, удаления и улавливания выделяющихся вредных отложений выявить пути повышения эффективности их работы на постах плазменной резки;
- теоретически исследовать взаимодействие тепловой гетерогенной струи, возникающей в месте резки, с потоком газа и отсосом, и на основании полученных результатов разработать высокоэффективный способ локализации удаления вредных отложений;
- разработать коаксиальное вытяжное устройство с торцевой раздачей потока для локальных вентиляционных систем, позволяющее локализовать выделяющиеся вредности в местах прохода плазменной дуги через металл;
- разработать экспериментальный стенд для экспериментального исследования конструкции отсоса, реализующую предложенный способ удаления вредных отложений и сравнить полученные результаты с теоретическими данными.
- уточнить методику подбора коаксиального вытяжного устройства для локальных вытяжных систем;
- выполнить оценку экономической эффективности внедрения локального вытяжного устройства в сравнении с вытяжными устройствами на основе вытяжных столов, применяемых при плазменной резке металлов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основании анализа литературных источников и систематизации существующих в сварочном производстве способов и средств локализации, удаления и улавливания выделяющихся вредных отложений выявлены пути повышения эффективности их работы на постах плазменной резки, что позволило предложить новый конструктивный подход к взаимодействию факела отсоса и приточной струи.
2. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования всасывающих факелов коаксиального вытяжного устройства, ограниченного раздающим радиально направленным потоком, позволили определить значения осевых скоростей при различных расходах воздуха с рациональным соотношением их расходов (β) для предложенной конструкции местного отсоса (ППМ РФ №207 611);
3. Определены геометрические параметры устойчивой работы местного отсоса предложенной конструкции в результате численного моделирования, что позволило выявить рациональную компоновочную схему локального вытяжного устройства.
4. В результате численного моделирования динамических характеристик результирующего потока выявлено, что для значений соотношения потоков $\beta=0,8-1$ достигается отсутствие негативных факторов взаимодействия струй при формировании приточного потока воздуха в виде радиальной веерной струи. Также определено, что схемы, при которых значения соотношений потоков при

$\beta > 1$, приводит к несколько большей стабилизации потока, а угол раскрытия отсекающего радиального потока приближается к 90° .

5. Выявлено, что для компоновочных решений установок для локальной вытяжной вентиляции значение β не целесообразно корректировать в сторону увеличения для устройств с одним побудителем на подающий и всасывающий поток. При этом, определен диапазон варьирования соотношений расходов воздуха на формирование ограничивающей струи, равный $0,8 \leq \beta \leq 1$.

6. Получено регрессионное уравнение, позволившее определить рациональное соотношение объемов приточного и удаляемого воздуха с учетом воздействия плазменной струи, при установленных скоростях удаляемого воздуха согласно нормативной документации в плоскости реза.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в моделировании процессов, происходящих в зоне взаимодействия тепловой гетерогенной струи, возникающей в месте резки, с потоком газа и приточного и вытяжного потоков отсоса, позволяющего на основании полученных результатов предложить высокоэффективный способ локализации удаления вредностей, реализованный в новой конструкции локального вытяжного устройства, отличающейся тем, что за счет рациональных компоновочных решений происходит увеличения осевой скорости при удалении вредностей при различных соотношениях расходов приточного и удаляемого воздуха. Также, в результате экспериментальных исследований получены новые зависимости осевых скорости от удаления источника вредностей при соответствующих расходах воздуха.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Получено экспериментальное подтверждение данных, полученных при моделировании воздействия всасывающего и радиально направленного ограничивающего потока;

2. Определены геометрические параметры устройства, при которых достигается увеличение зоны действия всасывающего потока.

3. Предложены конструктивные решения вытяжного устройства локальных систем вентиляции для удаления вредных выделений при плазменной обработке металлов позволяющее достичь требуемых параметров микроклимата воздуха рабочей зоны (патент №207611).

4. Результаты диссертационной работы внедрены и приняты к проектированию в автомобильном подразделении ГКУ РК Вспомогательная служба УД ГС РК и в Управлении делами Госсовета Республики Крым. Также результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01 и 08.04.01 - Строительство.

Методология и методы исследований.

Поставленные задачи решались математическими методами физического и численного моделирования. Физическое моделирование использовалось для получения зависимостей, которые формулируют методики расчета аэродинамических и эколого - энергетических параметров результирующего течения при взаимодействии потока плазмы со спектром всасывания и радиальной активированной струей.

Численное моделирование использовалось для получения пространственного представления линий тока, полей температуры, скорости и давления. Анализ экспериментальных данных производился при помощи методов математической статистики.

Достоверность полученных научных положений, выводов и рекомендаций основана на современных представлениях по аэродинамике, и теплопередачи подтверждена тем, что полученные результаты не противоречат выводам известных положений. Аэродинамические исследования процесса удаления вредностей от мест плазменной резки металла выполнены в лаборатории по вентиляции академии с использованием образцов известных мировых фирм, по договорам о сотрудничестве с институтом АСиА.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного моделирования аэродинамических, гидродинамических характеристик коаксиального вытяжного устройства, ограниченного раздающим радиально направленным потоком.

2. Предложенная конструкция коаксиального вытяжного устройства, состоящая из двух труб установленных соосно при этом трубопроводы расположены таким образом, что образуют межтрубное пространство при этом всасывающий поток организованный побудителем движется по внутренней трубе, а в межтрубном пространстве движется в противоточном направлении раздающий поток который по истечении из отверстия формирует ограничивающую зону, формируемую путем отражения от диффузора-ограничителя и далее радиально распространяется в пространство (ППМ № 207 611).

3. Регрессионная зависимость осевой скорости от расхода воздуха и удаленности от всасывающего отверстия коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции (ППМ № 207 611).

4. Уточненная методика инженерного подбора коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции.

5. Результаты расчетов экономической эффективности внедрения коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции.

Степень достоверности диссертационных исследований обоснована использованием фундаментальных положений законов аэрогидродинамики, современных методов вычислительной гидроаэродинамики и математики; применением современных методов численного моделирования, расчетно-аналитического программного обеспечения; подтверждается удовлетворительным согласованием итогов теоретических исследований с результатами экспериментальных исследований и верификацией полученных теоретических и экспериментальных данных.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научно-практических конференциях: I Международная научно-техническая конференция «Инженерные системы и энергоэффективность в строительстве, природообустройстве», сентябрь 2018 г., Крым; международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности», октябрь 2022, Симфери-

поль, XII; международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды», Уфа, 12-13 апреля 2023 года.

Внедрение. Техническое решение по локальной вытяжной вентиляции при помощи коаксиального вытяжного устройства, уточненная инженерная методика подбора коаксиального вытяжного устройства и методический подход к определению экономической эффективности внедрения локальной вытяжной вентиляции при помощи коаксиального вытяжного устройства апробированы на предприятиях Республики Крым (материалы исследований и методики расчета переданы в Управление делами Государственного совета Республики Крым) и внедрены в практику проектирования систем локальной вытяжной вентиляции в автомобильном подразделении ГКУ РК «Вспомогательная служба Управления делами Государственного Совета Республики Крым». Также результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01, 08.04.01 – Строительство.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; получен 1 патент РФ на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и постановке задач диссертационного исследования, выборе объектов и методов исследований, проведении литературного обзора, разработке теоретических положений работы, проведении численных и натурных экспериментов, обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке и публикации материалов работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, с выводами по каждой из них, заключения, условных обозначений, библиографического списка и приложений. Общий объем работы 163 страницы, в том числе: 138 страниц – основной текст, содержащий 16 таблиц, 99 рисунков, 52 формулы; список сокращений и условных обозначений на 5 страницах; список литературы из 113 наименований на 12 страницах; 4 приложения на 4 страницах.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности ВАК РФ: 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п 2. Технологические задачи 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. Очистка и расчет рассеивания загрязняющих веществ от вентиляционных выбросов,

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,

п 4. Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности,

п 5. Разработка и развитие экспериментальных методов исследований, анализа и обработки экспериментальных данных, процессов в системах теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума, зданий и сооружений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, обозначены объект и предмет исследований, поставлена цель и определены задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов исследования.

В первой главе проведен аналитический обзор методов и средств локальной вытяжной вентиляции при плазменной обработке металлов, который показал значительный потенциал для совершенствования локальных вытяжных систем при плазменной обработке металлов за счет снижения требуемого количества воздуха для удаления вредностей от нестационарных мест постов плазменной резки, а именно:

– Изучены современные устройства для локальных вытяжных систем, применяемых в местах для плазменной резки при этом установлено, что наиболее распространенными из них являются системы с удалением образующихся вредностей из нижней зоны плоскости раскроечной заготовки при помощи вытяжных секционных столов.

– Установлено, что, несмотря на многообразие вытяжных систем, они требуют значительных объемов удаляемого воздуха от 4000 м³/ч и более, отличаются низкой эффективностью в связи с быстрым затуханием скоростей спектра всасывания.

На основании проведенного анализа предложено локализовать и удалять вредности с помощью активированного радиальной прямоточной струей местного отсоса из зоны ниже плоскости расположения металла, которые составляют основную часть от вредностей, выделяемых при плазменной резке.

Во второй главе проведен анализ производственных процессов, технологии и вредных производственных факторов при плазменной резке металлов. Выделены определяющие технологические факторы, влияющие на места образования вредных выделений, количество и состав вредностей.

В третьей главе выполнены теоретические исследования характеристик активированного радиальной прямоточной струей местного отсоса согласно схемы приведенной на рисунке 1 и взаимодействие тепловой гетерогенной струи,

возникающей в месте резки, с потоком газа и отсосом, и на основании полученных результатов разработан эффективный способ локализации удаления вредных веществ. Экспериментально исследованы конструкция отсоса, реализующая предложенный способ удаления вредных веществ, проведено сравнение полученных результатов с теоретическими данными.

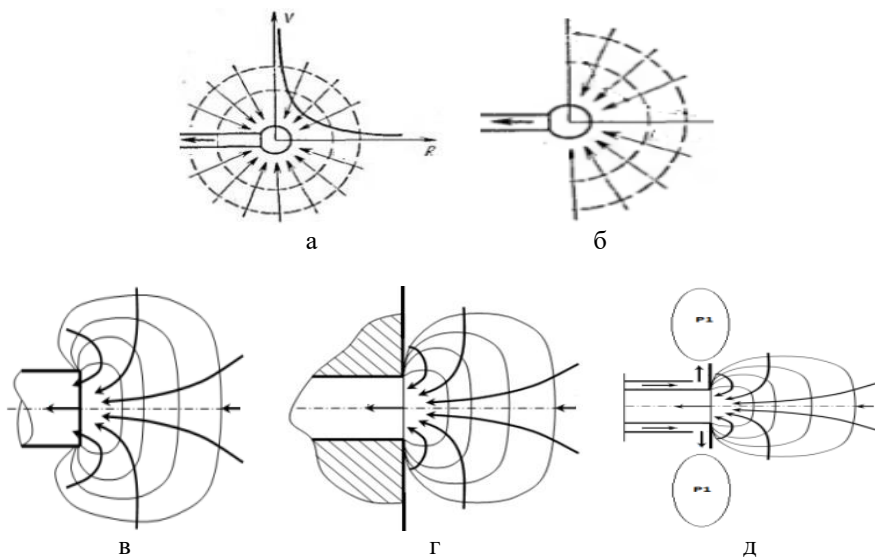


Рисунок 1– схемы и модели организации всасывающих течений:

а) модель точечного стока; б) модель точечного стока, ограниченного приточной струей; в) схема точечного стока; г) схема всасывающего устройства в строительной конструкции; д) схема раздачи ограничивающего воздушного потока в плоскости перпендикулярной оси всасывающего потока.

Для определения параметров местного отсоса, активированного радиальной приточной струей, было произведено моделирование и расчет системы в диапазоне ее функционирования соответствующий наиболее часто применяемой номенклатуре металлов при плазменной обработке. На основании полученных данных, сведений, изложенных во второй главе по параметрам, характеризующим локальное вытяжное устройство, определена конструкция местного отсоса.

Определение параметров состояло из нескольких этапов:

На первом этапе была создана цифровая модель коаксиального отсоса, с торцевой раздачей ограничивающего потока основанная на принципе повышения потенциала всасывающих течений путем ограничения спектра всасывания отсеканием потока раздачей ограничивающего воздушного потока в плоскости перпендикулярной оси всасывающего потока для создания зоны повышенного давления, формируемой потоком истекающего воздуха в плоскости близкой, перпендикулярно оси всасывания для формирования подобия отсекающей плоскости в программе Cosmosflowworks программного комплекса Solidworks с приложением Flowsimulation.

Построенная модель состоит из двух труб, установленных соосно при этом трубопроводы расположены таким образом, что образуют межтрубное пространство. Всасывающий поток, организованный побудителем, движется по внутренней трубе. В межтрубном пространстве движется в противоточном направлении раздающий поток. Раздающий поток по истечении из отверстия формирует ограничивающую зону. Воздушный поток отражается от диффузора-ограничителя и концентрически распространяется в пространство.

Начальными условиями для моделирования (Рисунок 2) были приняты следующие данные: атмосферное давление - $P_a=101325$ Па, температура воздуха $t_n= 20$ С °, расход воздуха проходящего в межтрубном пространстве и во внутренней трубе - $Q_{vy}=1000$ м³/ч, длина участка трубы внутренней $l_{vy}=500$ мм, внешней $l_{вн}= 490$ мм. В первом приближении задавался размер диффузора-ограничителя диаметром $D_d=100$ мм с последующим увеличением на 100 мм с итоговым значением 200 мм. Диаметры внутреннего D_v и наружного D_n трубопровода составили 100 мм и 115 мм соответственно. Угол диффузора ограничителя относительно оси трубопроводов - 90°

По результатам моделирования были получены результаты, отражающие спектр всасывания классического без активации местного отсоса, а также построен график распределения скорости, который показал ее затухание на расстоянии полутора диаметров.

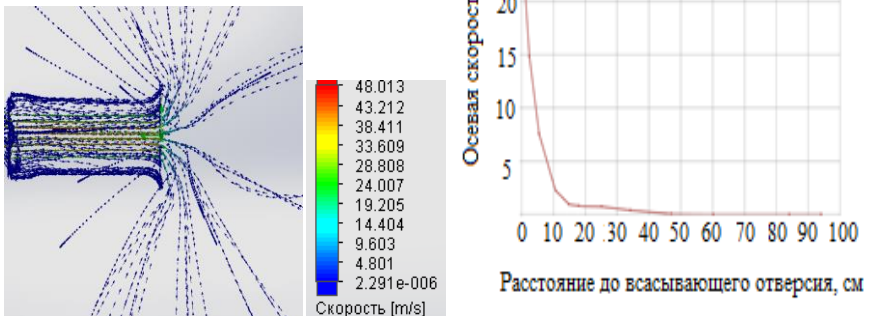


Рисунок 2- спектр всасывания классического (без ограничения) местного отсоса и зависимость падения скорости воздуха от удаленности от всасывающего отверстия.

Далее последовательно определялись параметры активированного отсоса, позволяющие добиться устойчивости раздающего потока:

- **определение расстояния, образывающего раздающую щель** (рисунок 3), при котором формируется устойчивый ограничивающий поток. Для этого последовательно задавалось значение расстояния между внешней трубой и диффузором-ограничителем со смещением к стенке диффузора в диапазоне от 35 до 15 мм с шагом 15 мм и 5 мм при достижении значения $l_1=20$ мм.

По результатам моделирования получено расстояние щели, при котором происходит устойчивое раскрытие раздающего потока равное 20 мм.

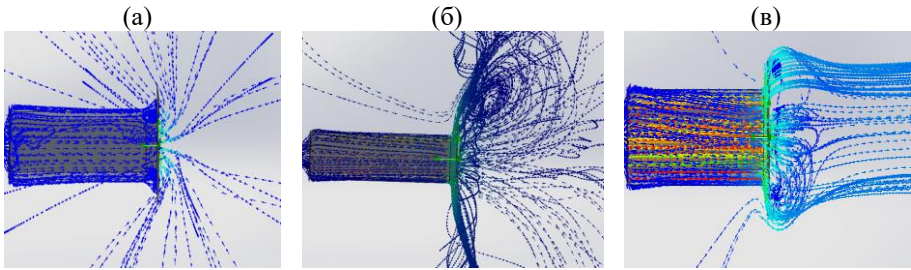


Рисунок 3- спектр всасывания местного отсоса с действием ограничивающего потока при размере щели равном:

а) $l_1=35$ мм, б) $l_1=20$ мм, в) $l_1=15$ мм.

- **определение границы устойчивого раскрытия ограничивающего потока** (рисунок 4) исходя из условий изменения угла раскрытия кромки диффузора-ограничителя $\alpha=45^\circ$ с последовательным уменьшением расстояния $l_1= 35$ мм, 25мм, 15 мм.

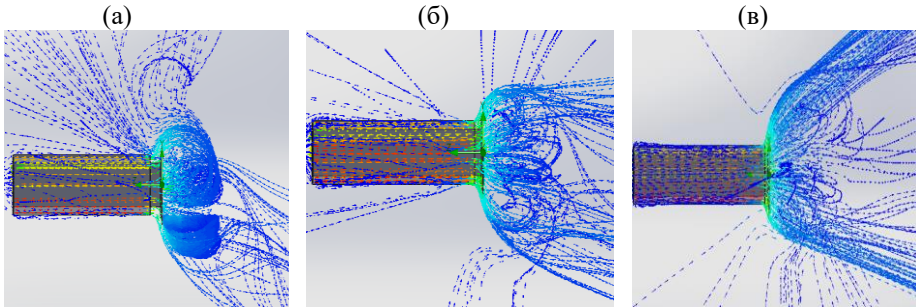


Рисунок 4- спектр всасывания местного отсоса с действием ограничивающего потока при угле раскрытия кромки диффузора-ограничителя $\alpha=45^\circ$ и размере щели равном: а) $l_1=35$ мм, б) $l_1=20$ мм, в) $l_1=15$ мм.

Установлено, что действие ограничивающего потока недостаточно для формирования условий, препятствующих захвату раздающего потока всасывающим при углах раскрытия кромки диффузора на угол отличный от $\alpha=90^\circ$.

-**влияние взаимодействия, раздающего и всасывающего потоков при их различном соотношении.** На эффективность формирования устойчивого отсекающего потока также оказывает влияние соотношение заданных расходов и, как следствие, скоростей потоков. Снижение влияния негативных факторов взаимодействия струй возможно при формировании приточного потока воздуха в виде радиальной веерной струи, при определенном соотношении расходов, выраженных следующей зависимостью:

$$Q_{B1} = \beta * Q_{B2} \quad (1)$$

где: Q_{B2} - расход воздуха на формирование ограничивающего потока, $\text{м}^3/\text{ч}$; Q_{B1} - расход удаляемого воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; β - соотношение расходов для формирования, ограничивающего потока и удаляемого потока, при этом для установок с одним побудителем $Q_{B2} \leq \beta \leq Q_{B1}$.

Установлено, что для значений соотношения потоков $\beta=0,8-1$ достигается отсутствие негативных факторов взаимодействия струй при формировании приточного потока воздуха в виде радиальной веерной струи. Визуализация взаимного влияния потоков приведена на рисунке 5.

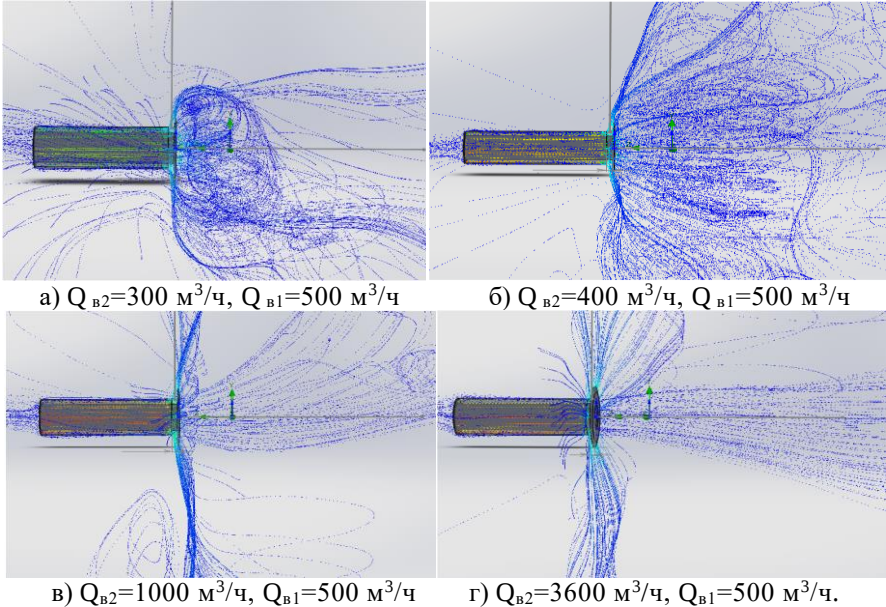


Рисунок 5- спектр всасывания местного отсоса с действием ограничивающего потока при соотношении расходов равном: а) $\beta=0,6$; б) $\beta=0,8$; в) $\beta=2$; г) $\beta=7,2$

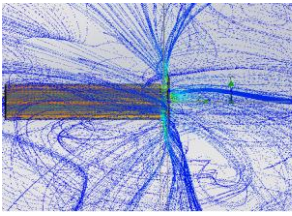
Таким образом, определен диапазон варьирования соотношений расходов воздуха на формирование ограничивающей струи, расход удаляемого воздуха равный $0,8 \leq \beta \leq 1$.

В связи с тем, что взаимодействие тепловой гетерогенной струи, возникающей в месте резки, с потоком газа и отсосом в системе локальной вентиляции предложенной конструкции носит нестационарный характер по режиму течения, а принятая конструкции отсоса дает сложное взаимодействие потоков, численное моделирование их взаимодействие выполнено на основании математического аппарата, предлагаемого программным продуктом FlowSimulation комплекса SolidWorks.

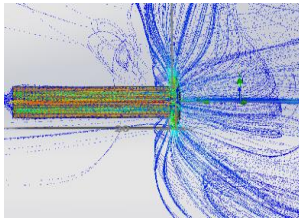
Для определения влияния потока неизотермической струи, расположенной соосно с центром вытяжного отверстия модель струи, была задана следующими параметрами $Q_{вр}=0,00083 \text{ кг/с}$, $Q_r=140 \text{ л/с}$, $t_r=3000 \text{ С}^\circ$, с учетом концентраций оксида углерода, а также оксидов азота, что соответствует режиму плазменной резки стальной заготовки толщиной 50 мм, с соответствующим уровнем вредных выделений диктующей вредности - оксида железа.

На рисунке 6 показаны спектры всасывания при взаимодействии потоков, полученные по результатам моделирования. На рисунке 7 приведены поля

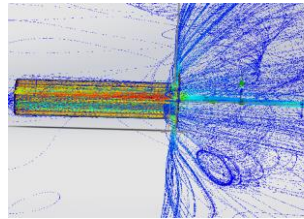
скоростей полученные по результатам моделирования для соответствующих расходов.



а) $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$

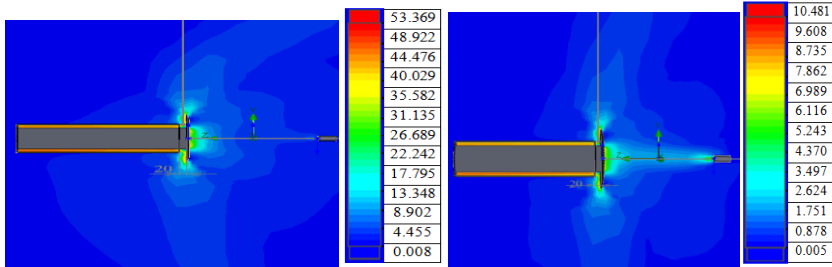


б) $Q=600 \text{ м}^3/\text{ч}$



в) $Q=200 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 6- спектры всасывания местного отсоса с взаимодействием со струей, образующейся при плазменной резке при расходах удаляемого воздуха равных: а) $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $Q=600 \text{ м}^3/\text{ч}$; в) $Q=200 \text{ м}^3/\text{ч}$



а) $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$

б) $Q=200 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 7- поля скорости местного отсоса с взаимодействием со струей, образующейся при плазменной резке при расходах удаляемого воздуха равных: а) $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $Q=200 \text{ м}^3/\text{ч}$

Анализ полученных данных (рисунок 8) показал, что при предложенном способе удаления вредностей активированным местным отсосом получено увеличение осевой скорости всасывания по сравнению с классическим отсосом в широком диапазоне расходов удаляемого воздуха, также при взаимодействия приточной струи и всасывающего факела при воздействии плазменной струи.

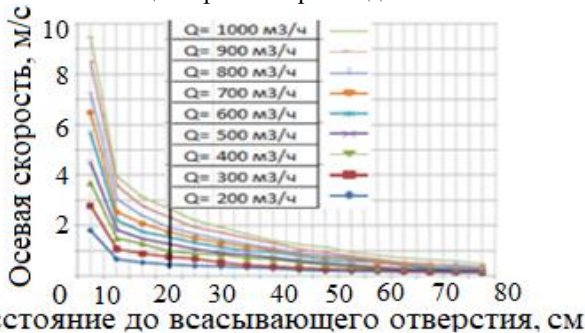


Рисунок 8- сводный график осевых скоростей местного активированного местного в диапазоне расходов $Q=200-1000 \text{ м}^3/\text{ч}$

Полученная модель вытяжного устройства сравнивалась с моделями вытяжных устройств, (рисунок 9) на прототипе устройства по патенту №RU 2046258 и модели вытяжного устройства с двумя дисками (рисунок 10).

По результатам сравнения значений осевых скоростей коаксиального вытяжного устройства, устройства по патенту №RU 2046258 и модели вытяжного устройства с двумя дисками построены сравнительные графики приведенные на рисунке 9 и рисунке 11.

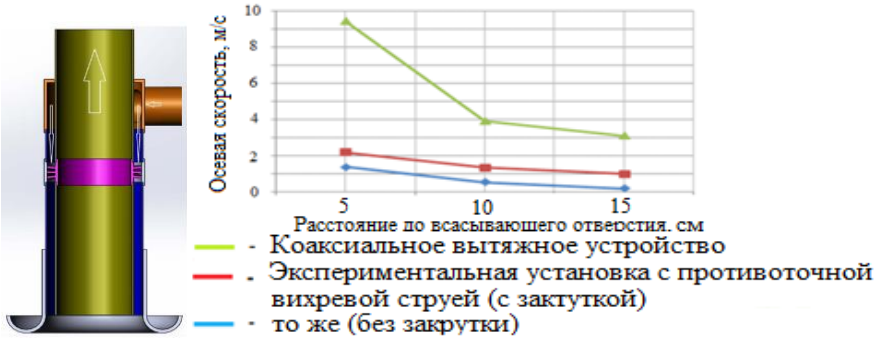


Рисунок 9- Схема экспериментального местного отсоса с противоточной вихревой струей по патенту №RU 2046258 и график осевых скоростей коаксиального вытяжного устройства и установки с противоточной вихревой струей

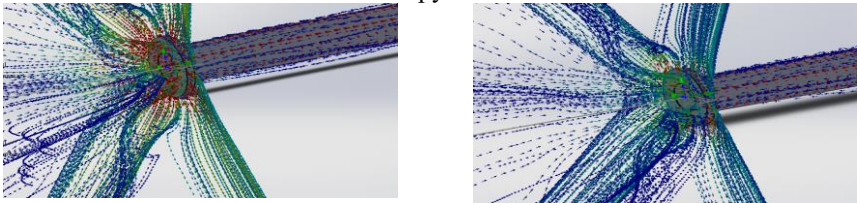
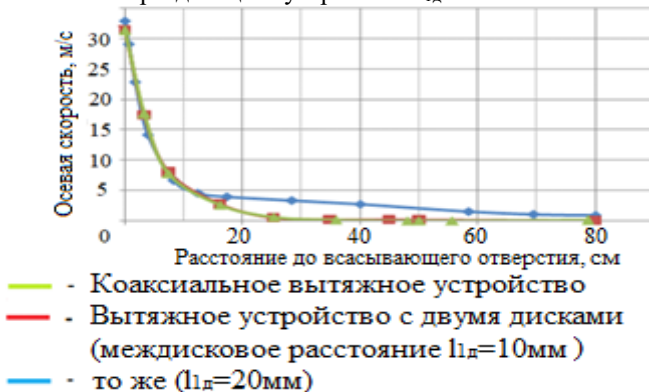


Рисунок 10 - Визуализация траектории потоков при $Q_{вх}=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\beta=1$ и траектории потоков при $Q_{вх}=500 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\beta=1$ при междисковом расстоянии раздающего устройства $l_{д}=20 \text{ мм}$



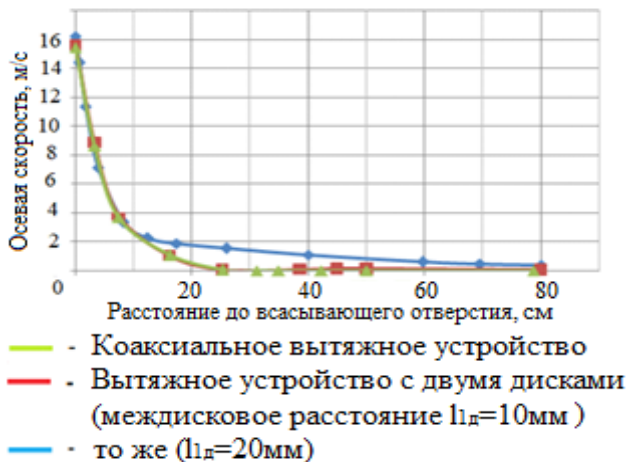


Рисунок 11 – Графики осевых скоростей коаксиального вытяжного устройства и вытяжного устройства, с двумя дисками, соответственно
 $Q_b=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_b=500 \text{ м}^3/\text{ч}$

В результате сравнения моделей локального вытяжного устройства предложенной конструкции, устройства по патенту № 2046258 и модели вытяжного устройства с двумя дисками установлено, что осевая скорость коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции имеет несколько более высокие значения.

Таким образом, полученные результаты численного моделирования, позволили разработать конструкцию местного активированного отсоса в виде коаксиально расположенных труб с диффузором ограничителем для работы в широком диапазоне расходов для локальных вытяжных систем при плазменной обработке металлов позволяющие улучшить условия труда (патент на полезную модель устройства № 207 611).

В четвертой главе, для получения численных характеристик работы предложенной конструкции активированного местного отсоса, были выполнены экспериментальные исследования на разработанном экспериментальном стенде (рисунок 12, 13).

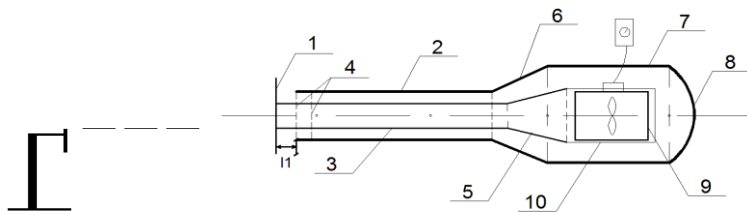


Рисунок 12 – Схема и общий вид экспериментального стенда:
 Диффузор-ограничитель (1), наружная труба (2), внутренняя труба (3), насадка (4), внутренний конус (5), внешний конус (6), корпус установки (7), поворотная камера (8), вентилятор (9), корпус вентилятора (10)



Рисунок 13 –Общий вид экспериментально стенда:

Для определения зоны действия всасывающего течения на расстоянии 800 мм от всасывающего патрубка устанавливался штатив с закрепленным на нем анемометром марки АТЕ 1034 "Актаком". Штатив юстировался относительно оси всасывающего отверстия лазерным уровнем, путем установки соосно уровня, диффузора и далее штатива с анемометром. Во время опыта штатив устанавливался на размеченный трафарет размерами 1000x1000 мм размеченный с шагом в 50 мм при этом одна из сторон трафарета устанавливалась по центру относительно оси диффузора так чтобы ось диффузора совпадала с центральной осью трафарета. Ориентируясь на значения расстояний, полученных по результатам моделирования при проведении замеров штатив, передвигался от всасывающего отверстия, в противоположную сторону смещаясь к ранее определенной границе зоны действия всасывающего потока в контрольные точки на фиксированном расстоянии равном 50 мм до момента фиксации показаний на табло анемометра, при этом проводилась серия опытов с усреднением итоговых показаний. Измерения проводились в контрольных точках, серий не менее чем из пяти замеров, с разностью между результатами в серии отличной более чем на $\pm 5\%$, в обратном случае серия замеров проводилась повторно.

Обработка полученных данных для получения закономерности между эффективностью всасывания характеризующейся осевой скоростью, а именно удаленностью устройства от оси выделения вредностей с целью эффективного его позиционирования и расходом воздуха на всасывание вредностей и формирование ограничивающего потока в широком диапазоне изменений расхода воздуха, а также эффективным диапазоне изменения скорости всасывающего воздуха на оси для активированного локального коаксиального отсоса с радиальной раздачей ограничивающего потока воздуха предложенной конструкции проводилось с помощью теории планирования на основании ортогонального плана 1-го порядка.

Определение основных влияющих факторов исследований выполнено с соответствующей оценкой значимости по критерию Стьюдента и адекватности по критерию Фишера.

Исследование аэродинамических характеристик проводилось для выявления закономерности между осевой скоростью V_0 , м/с, расстоянием по оси от места образования вредных выделений L , см, в зависимости от объемного расхода

воздуха на всасывание и формирование ограничивающего потока $Q_{вс}$, м³/ч для вытяжного устройства предложенной конструкции.

В исследовании постоянными параметрами приняты: температура окружающей среды $t_{ср}=22$ С°, давление окружающей среды $P_{атм}=101325$ Па. Варьируемые параметры: объемный расход воздуха $Q_{вс}(X1) = 500 \div 1000$ м³/ч, расстоянием по оси от места образования вредных выделений $L(X2)=5 \div 30$ мм.

В результате обработки данных эксперимента получена регрессионная зависимость в натуральном выражении входящих величин:

$$V_o = 1,429667 + (-0,518) * (0,01 * Q - 7,5) + (-0,14633) * (0,2 * L - 5) \quad (2)$$

где: $Q_{вс}$ – объемный расход воздуха;

L – расстоянием по оси от места образования вредных выделений

По полученному регрессионному уравнению (1) построен график зависимости осевой скорости от расстояния до всасывающего отверстия при заданных расходах воздуха приведенный на рисунке 14.

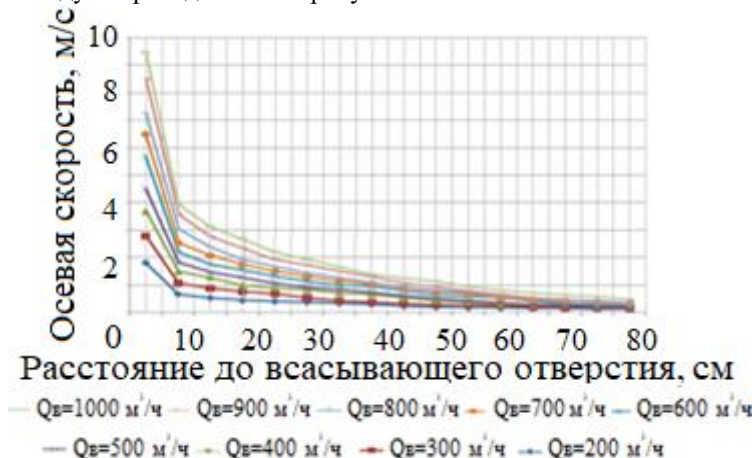


Рисунок 14– график зависимости осевых скоростей от удаленности от оси всасывающего отверстия при заданных расходах Q м³/ч и значении $\beta=1$

Метрологический анализ экспериментальных исследований показал ошибку в пределах 5 %, что позволяет говорить о достаточной достоверности полученных результатов.

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований проводилось на основании графоаналитического метода, и показало расхождение в пределах 5 %, что подтверждает адекватность полученных результатов и говорит о возможности их использования в инженерных расчетах.

Сопоставление итогов теоретических исследований и данных, полученных в результате экспериментальных исследований, осуществлялось с использованием графического метода в форме сравнения сходимости графиков осевых скоростей всасывающего потока в зависимости от удаленности от всасывающего патрубка.

Графики сходимости осевых скоростей по итогам теоретических и экспериментальных исследований при $Q_1 = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при $Q_2 = 455 \text{ м}^3/\text{ч}$ представлены на рисунке 15. Среднее расхождение составило не более 5%.

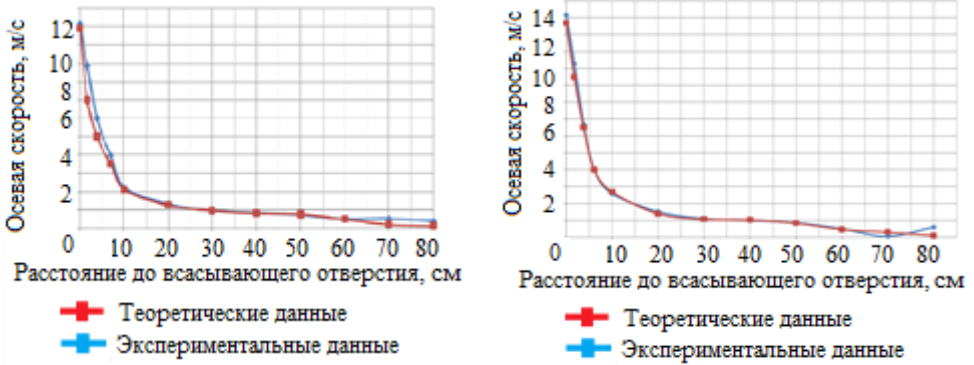


Рисунок 15-График сходимости осевых скоростей по итогам теоретических и экспериментальных исследований при $Q_1 = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $Q_1 = 455 \text{ м}^3/\text{ч}$

В целом, картина распределения скорости в теоретических и экспериментальных исследованиях для выбранных точек, совпали. Анализируя данные с помощью критерия достоверности Стьюдента можно сказать, что с вероятностью 0,95 95% значений теоретических и экспериментальных исследований равны.

Таким образом, сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований аэродинамических характеристик коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции, подтвердило адекватность результатов теоретических исследований, и правильность сделанных в результате экспериментальных исследований выводов, при этом расхождение результатов не превышает 5%, что свидетельствует о правомерности применения полученных экспериментальным путем зависимостей в инженерных методах расчетов.

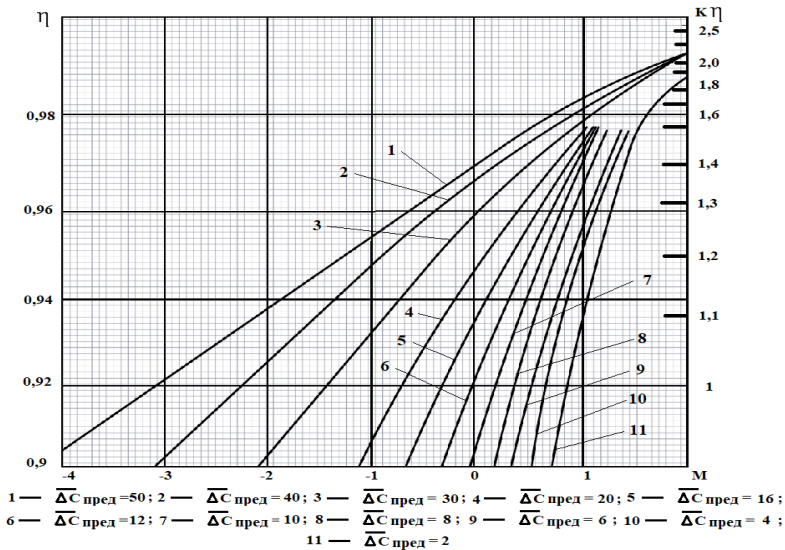
В пятой главе приведена методика проведения промышленного испытания оборудования, уточненная методика подбора местного отсоса, а также технико-экономическое обоснование внедрения местного активированного отсоса в виде коаксиально расположенных труб с диффузором ограничителем.

Предлагаемая уточненная методика подбора локального вытяжного устройства приведена в таблице 1.

Таблица 1 – предлагаемая методика подбора локального вытяжного устройства предложенной конструкции

№ п.п.	Порядок действий расчета	Расчетная формула
1	Исходя из режима резки металла для диктующей вредности определяем выделение вредного вещества, г/с	$G = \frac{q * l}{3600}$

2	Расход воздуха, м ³ /ч	$0,01 * Q - 7,5 = \frac{V}{0,765337 * (0,2 * L - 5)}$
3	Относительная предельная избыточная концентрация примесей в воздухе, удаляемых отсосом, соответствующая режиму предельного улавливания	$\frac{\Delta C_{\text{пр. п. из}}}{(\text{ПДК} - C_{\text{пв}})} = \frac{\Delta C - C_{\text{пв}}}{(\text{ПДК} - C_{\text{пв}})}$ $C_{\text{пв}} \leq 0,3 \text{ ПДК}$
4	Значение безразмерного комплекса Мп	$M_{\text{п}} = \frac{(G_{\text{п}})}{(G)} * \Delta C_{\text{пр. п. из}} - \frac{(Q_{\text{в}})}{(Q)}$
5	Эффективность улавливания вредных веществ $\eta_{\text{от}}$ и соответствующее значение $K\eta$.	Рисунок 16
6	Требуемая производительность отсоса $Q_{\text{от.п.}}$, м ³ /с обеспечивающая требуемую эффективность улавливания вредных веществ	$Q_{\text{от.п.}} = K\eta * Q$
7	Кол-во уловленных выделений $G_{\text{у}}$, мг/с в воздухе, удаляемом местным отсосом	$G_{\text{у}} = \eta_{\text{от}} * G$
8	Концентрация вредных веществ $G_{\text{уд}}$, мг/м ³ в воздухе	$G_{\text{уд}} = \frac{G_{\text{у}}}{Q_{\text{от.п.}}}$

Рисунок 16 -График определения значений $\eta_{\text{от}}$ и $K\eta$

Для расчета показателей технико-экономической эффективности реализован следующий подход к определению экономической эффективности внедрения устройства на оборудовании для плазменной резки. Для оценки экономической эффективности применен подход, основанный на сопоставлении капитальных и эксплуатационных затрат системы удаления с местным отсосом предложенной конструкции и вредных веществ с секционным столом.

Для оценки эффективности работы промышленного образца устройства в условиях производства применялся весовой метод оценки запыленности помещения. Результаты проведенного анализа запыленности приведены в таблице 2. Процесс реза стальной заготовки представлен на рисунке 17.

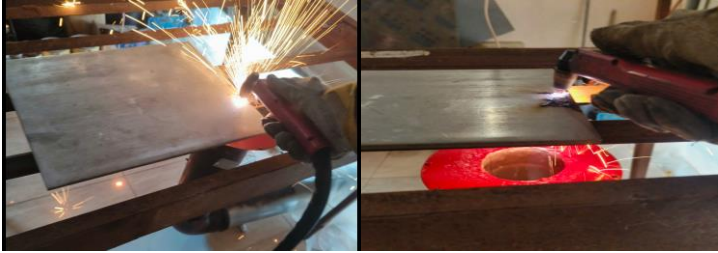


Рисунок 17 –Процесс реза заготовки

Таблица 2 - Результаты определения запыленности помещения

Определение запыленности помещения до плазменной резки				Определение запыленности помещения после плазменной резки			
1		2		3		4	
Масса фильтра до замера, г		Масса фильтра после замера, г		Масса фильтра до замера, г		Масса фильтра после замера, г	
фильтр 1	фильтр 2	фильтр 1	фильтр 2	фильтр 1	фильтр 2	фильтр 1	фильтр 2
0,1030	0,0965	0,1096	0,1093	0,091	0,099	0,103	0,105
Разница в весе фильтров до и после аспирации воздуха при соответствующих вариантах определения запыленности помещения, г							
0,0066 / 0,012				0,012 / 0,006			
Запыленность помещения до плазменной резки, мг/м ³				Запыленность помещения после плазменной резки, мг/м ³			
0,0311				0,0289			

В результате установлено снижение запыленности помещения на 2,2 мг/м³ при включении в работу локального вытяжного устройства предложенной конструкции в сравнении с режимом до включения его в работу.

Для расчета показателей технико-экономической эффективности приведен методический подход к определению экономической эффективности внедрения устройства для локальной вытяжной вентиляции предложенной конструкции в сопоставимых условиях.

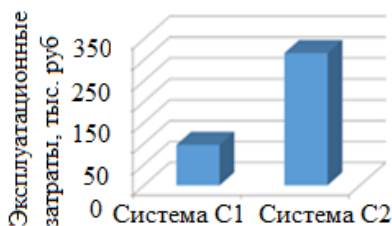
Стоимость компонентов (расходных материалов, рабочих операций, стоимость готовых конструкций) для сопоставляемых систем принята по ценовой информации в соответствии с п. 2 статьи 22 Федерального закона "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" от 05.04.2013 № 44-ФЗ методом анализа ценовой информации из открытых источников, складывается из стоимости элементов системы для установки с локальным вытяжным устройством (ЛВУ), а также системы с секционным вытяжным столом состоящих из

воздуховодов, фасонных частей, вентилятора, фильтро-вентиляционной установки, раскроечного стола - система С1, а также стола с секционным местным отсосом для системы С2. Итоги сравнительного анализа затрат при внедрении систем С1 и С2 приведены в таблице 3 и на графиках рисунка 18.

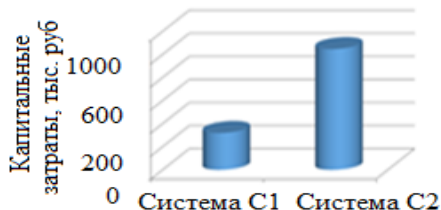
Таблица 3- Затраты на устройство вытяжных систем С1 и С2

Затраты на устройство системы с ЛВУ предложенной конструкции, тыс. р.			Затраты на устройство системы с секционным вытяжным столом, тыс. р.	
1	2	3	4	5
№ п.п	Наименование	Стоимость	Наименование	Стоимость
1	Воздуховоды	7,8	Воздуховоды	18,6
2	Фасонные части	1,26	Фасонные части	19,8
3	Вентилятор ВЦ-14-46-2	10,6	Вентилятор ВЦ-14-46-4	33,7
4	ФВУ-1 СФ	160,0	ФВУ-9	600,0
5	Раскроечный стол	75,0	Раскроечный стол с секционной вытяжкой СПР-03	250,0
6	Монтажные работы	65,0	Монтажные работы	125,0

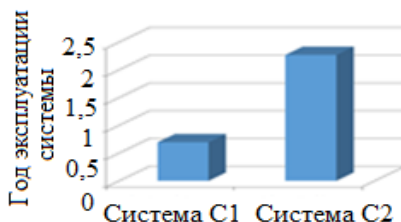
На единицу продукции для системы С1 приходится 311860,07 руб. капитальных затрат, что на 229,79% меньше по сравнению с системой С2.



а



б



в

Рисунок 18- Графики сравнения эксплуатационных (а), капитальных (б) затрат и сроков окупаемости (в) систем С1 и С2

Итоги выполненного исследования

1. На основании анализа литературных источников и систематизации существующих в сварочном производстве способов и средств локализации, удаления и улавливания выделяющихся вредностей выявлены пути повышения эффективности их работы на постах плазменной резки, что позволило предложить новый конструктивный подход к взаимодействию факела отсоса и приточной струи.

2. Разработана цифровая и натурная модель вытяжного устройства локальной вентиляции, установлены параметры, оказывающие влияние на характер потоков, образованных радиальными и всасывающим факелом вытяжного устройства.

3. На основании проведенных экспериментального и теоретического исследования всасывающих факелов коаксиального вытяжного устройства, ограниченного раздающим радиально направленным потоком впервые определены значения осевых скоростей при различных расходах воздуха с рациональным соотношением расходов β для запатентованной конструкции местного отсоса.

4. В результате численного моделирования выявлено, что для значений соотношения потоков $\beta = 0,8-1$ достигается отсутствие негативных факторов взаимодействия струй при формировании приточного потока воздуха в виде радиальной веерной струи. Также определено, что схемы, при которых значения соотношений потоков при $\beta > 1$, приводят к несколько большей стабилизации потока, а угол раскрытия отсекающего радиального потока приближается к 90° .

5. Выявлено, что для компоновочных решений установок для локальной вытяжной вентиляции значение β не целесообразно корректировать в сторону увеличения для устройств с одним побудителем на подающий и всасывающий поток. При этом, определен диапазон варьирования соотношений расходов воздуха на формирование ограничивающей струи, равный $0,8 \leq \beta \leq 1$.

6. Получено подтверждение экспериментальных данных, полученное при моделировании воздействия всасывающего и радиально направленного ограничивающего потока.

7. Получены геометрические параметры устройства, при которых достигается улучшение условий действия всасывающего потока.

8. Проведено теоретическое исследование всасывающего факела коаксиального вытяжного устройства, ограниченного раздающим радиальнонаправленным потоком.

9. Предложены конструктивные решения вытяжного устройства локальных систем вентиляции для удаления вредны выделений при плазменной обработке металлов, позволяющие улучшить условия труда (патент №207 611).

10. На ряде предприятий Республики Крым результаты диссертационной работы приняты к внедрению. Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 2.1.3. - "Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение". Техническое решение по локальному вытяжному устройству

предложенной конструкции, уточненная методика подбора и испытаний устройства, и методический подход к определению экономической эффективности внедрения локального вытяжного устройства предложенной конструкции приняты к внедрению для применения и эксплуатации в учреждениях Республики Крым (ГКУ РК «Вспомогательная Служба УД ГС РК», Управление делами ГС РК). Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы рекомендуются для внедрения производственным организациям занятых обработкой металлов при помощи технологии плазменной резки.

Перспектива дальнейших исследований состоит в проработке возможности применения локального вытяжного устройства предложенной конструкции в других технологических процессах, а также применении коаксиального устройства в системах общеобменной вентиляции, совершенствовании вытяжного устройства предложенной конструкции. В разработке новых вытяжных устройств, основанных на принципе формирования ограничивающих радиальных потоков.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Статьи в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных
ВАК РФ*

1. Зайцев О.Н., Исследование активированного радиальной струей всасывающего потока из зоны плазменной резки/ Зайцев О.Н., **Сиваченко Ю.А.**// Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова, 2024. - №10. -С.44-52;
2. Зайцев О.Н., Способ повышения эффективности удаления вредностей от постов плазменной резки/ Зайцев О.Н., **Сиваченко Ю.А.**// Строительство и техногенная безопасность, 2024. -№34. —С.45-49;
3. **Сиваченко, Ю.А.** Совершенствование местного отсоса от плазменной резки мелкосерийных деталей / Ю.А. Сиваченко // Экономика строительства и природопользования. — 2021. — №4(81). — С. 28-32;
4. **Сиваченко, Ю.А.** Влияние геометрических параметров коаксиального отсоса на характеристики удаляемого потока/ Ю.А. Сиваченко, А.Н. Кабанов, О.Н. Зайцев// Строительство и техногенная безопасность.-2022. №S1.-С 234-238.

Статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

5. **Sivachenko Yu.A.** Thermodynamic characteristics of the flue gas heat recuperator of a combined autonomous heat generating unit//**O. N. Zaycev;** S. A. Egorov; I. P. Angeluck; **Yu. A. Sivachenko** //IOP Conf.Series: IV International Scientific Conference “Investments. Construction. Real Estate: New Technologies and Targeted Development Priorities 2021. - 2022 -№ 2434;
6. **Sivachenko Yu.A.** Thermodynamic characteristics of an autonomous heat recuperator of flue gases of periodic action/**Zaitsev Oleg;** Egorov Sergey; Ange-luckIliya; **Sivachenko Yuri**// IOP Conf. Series: PROCEEDINGS OF THE II SCIENTIFIC CONFERENCE “MODELLING AND METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS.-2023 - № 2497 - page.29-38;

7. **Sivachenko Yu.A.** The Study of the Suction Activated by the End Supply Jet from Plasma Cutting Area/ **Oleg Zaitsev**, Natalia Semicheva, Andrey Ishutin, **Yuri Sivachenko**, Sergey Egorov //IOP Conf. Series: Modern Problems in Construction Selected Papers. -2024 - №372- page. 437-445.

Статьи в сборниках трудов конференций

8. Гуцу, В. Способ удаления вредностей от мест плазменной резки/В. Гуцу, С.А. Егоров, Т.Д. Целый, О.Н. Зайцев, **Ю.А. Сиваченко**// Научное издание Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды. XII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Статьи и тезисы -Уфа: Изд-во ЦИТО+, 2023. — С. 133-136;

Объекты интеллектуальной собственности

9. Патент РФ № 207611. МПК51 F24F 7/08 (2006.01) Коаксиальное воз-
духораспределительное устройство с торцевой раздачей потока для вентиляци-
онных систем/ Зайцев О.Н., **Сиваченко Ю.А.** // № 2021105119; заявл. 25.02.2021;
опубл. 03.11.2021, Бюл. №31.

СИВАЧЕНКО ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ
ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____.____.2025 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ № ____

Отпечатано в издательстве «Ариал».

295024, г. Симферополь, ул. Севастопольская, д. 31 а.