



КОЗЛОВ ТИМУР АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВХОДЕ
В МЕСТНЫЕ ОТСОСЫ-РАСТРУБЫ С СОСТАВНЫМИ ПОЛКАМИ**

**2.1.3 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель:

Попов Евгений Николаевич
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Кочев Алексей Геннадьевич
Доктор технических наук, профессор,
Член-корреспондент РААСН
Заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение»
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»

Мартьянова Анна Юрьевна

Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»**

Защита состоится «07» июня 2024 г. 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, д. 46, ауд. 214 ГК.

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/Kozlov

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Во многих технологических процессах в зданиях и сооружениях выделяются вредные загрязняющие вещества: пары, газы, пыль, которые оказывают опасное воздействие на человека. Одной из профилактических мер для снижения воздействия вредных веществ является использование местной вытяжной вентиляции, применяемой для обеспечения необходимого микроклимата в различных помещениях. Обработку воздуха в помещении можно в целом интерпретировать как аспект «очистки», который охватывает методы вентиляции и удаления загрязнений. Одним из важных элементов систем вытяжной вентиляции является местный отсос, применение которого снижает негативное воздействие вредных веществ на здоровье работников, улучшает качество воздуха в рабочей зоне помещения, уменьшает отрицательное влияние загрязняющих веществ на окружающую среду, способствует повышению производительности и эффективности деятельности из-за сокращения количества пыли и газов, которые могут негативно сказаться на работе оборудования, освещения и создать неудобства для рабочих. Правильное проектирование, установка и регулярное обслуживание местного отсоса имеют особое значение для обеспечения его эффективной работы.

Несмотря на высокую эффективность местной вытяжной вентиляции по локализации и улавливанию загрязняющих веществ остается актуальной проблема снижения энергозатрат на ее эксплуатацию. Для снижения энергоёмкости систем местной вытяжной вентиляции исследуют и используют свойства отрывных, вихревых, рециркуляционных, закрученных, конвективных воздушных потоков и поведение в них пылевых частиц. В частности, развивается научное направление по снижению потерь давления в системах механической вентиляции за счет профилирования входных проемов вытяжных устройств или оптимизации их формы. Представляет научный и практический интерес изучить влияние полнок раструба на его эффективность и его аэродинамическое сопротивление.

Диссертационное исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации – проект НШ-25.2022.4; Российского научного фонда – проект № 24-29-00086.

Степень разработанности темы. Моделированию воздушных потоков вблизи всасывающих каналов местных отсосов, а также их конструированию посвящены труды Азарова В.Н., Батурина В.В., Боровкова Д.П., Гиль Б.Л., Гримитлина А.М., Гольцова А.Б., Дацюк Т.А., Должикова В. Н., Зайцева О.Н., Зарипова Ш.Х., Зиганшина А.М., Конышева И.И., Кочева А.Г., Лившица Г.Д., Логачева К.И., Мартыановой А.Ю., Посохина В.Н., Сафиуллина Р.Г., Талиева В.Н., Тирона О.В., Уляшевой В.М., Фиалковской Т.А., Шепелева И.А., *Gao R., Flynn M.R., Huang Y., Wang I.* и многих др.

Вытяжные зонты обычно рассматривались без различных уступов или выступов (полнок раструба), которые, как утверждается в ряде источников, повышают их эффективность или используются в технологических целях – для установки креплений, для подвеса зонта или установки жиросовловителей и других

первичных очистных устройств. В частности, утверждается, что при угле раскрытия зонтов больше 60° площадь вихревых зон резко возрастает, снижается область эффективного всасывания и следует использовать выступы или уступы, позволяющие достичь эффективного всасывания.

Цель исследования повышение эффективности местных отсосов-раструбов с составными полками с разработкой математических моделей отрывных воздушных течений на входе во всасывающие каналы.

Задачи исследования следующие.

1. Предложить и обосновать конструктивное исполнение отсоса-раструба с применением дополнительных полок, с возможностью сохранения дальности захвата вредных веществ, со сниженными коэффициентом местного сопротивления и энергоемкостью.

2. Разработать дискретные математические модели и их программно-алгоритмическую реализацию для расчета отрывных течений на входе в круглые отсосы – раструбы с выступом и с тремя полками в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости при помощи дискретных вихревых колец.

3. Предложить компьютерные модели отрывного течения при входе в отсосы-раструбы предложенной конструкции в рамках модели вязкой сжимаемой жидкости в программном комплексе *SolidWorks*. Доказать сеточную сходимость компьютерных моделей по параметру коэффициента местного сопротивления (КМС) и установить достоверность полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными.

4. Разработать лабораторные установки для исследования щелевых отсосов-раструбов с выступом и с тремя полками. Доказать воспроизводимость опытов по определению КМС при помощи критерия Кохрена по серии параллельных опытов.

5. Определить закономерности изменения границ вихревых зон и распределение скорости на входе в отсосы-раструбы с выступом в рамках моделей вязкой сжимаемой жидкости и идеальной несжимаемой жидкости в зависимости от длины выступа и угла наклона первой полки раструба. Численно и экспериментально определить зависимости КМС от длины выступа для щелевых и круглых отсосов-раструбов.

6. Установить закономерности изменения длин полок и углов их наклона для трех полок раструба, при которых обе вихревые зоны локализируются вдоль полок, не распространяясь далее. Численно и экспериментально выявить закономерности изменения КМС в зависимости от длин полок раструба и углов их наклона. Определить длины полок раструба и углы их наклона к оси отсоса, при которых КМС достигает наименьшего значения. Произвести сравнительный анализ поля скоростей трехполочного отсоса и отсоса с фланцем, а также очертаний вихревых зон, найденных численно и экспериментально.

7. Провести промышленную апробацию разработанного отсоса-раструба.

Объект исследования – местные отсосы-раструбы с составными полками.

Предмет исследования – отрывные течения, вихревые зоны и КМС при входе в местные отсосы-раструбы с несколькими полками.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих результатов.

1. В рамках модели идеальной несжимаемой жидкости разработаны дискретные математические модели отрывных течений на входе в круглые отсосы – раструбы с выступом и с тремя полками, их программно-алгоритмическая реализация. Предложены достоверные компьютерные модели отрывного течения при входе в отсосы-раструбы с выступами и с тремя полками в рамках модели вязкой сжимаемой жидкости в программном комплексе *SolidWorks*.

2. По разработанным вычислительным алгоритмам с использованием метода дискретных вихревых колец и компьютерной модели, построенной в среде *SolidWorks*, определены закономерности изменения границ вихревых зон и распределение скорости на входе в отсосы-раструбы с выступом, в зависимости от длины выступа и угла наклона первой полки раструба.

3. Численно и экспериментально установлены зависимости КМС от длины выступа для щелевых и круглых отсосов-раструбов, получены аналитические выражения для расчета их КМС.

4. Найдены закономерности изменения длин трех полок раструба и углов их наклона, при которых обе вихревые зоны локализуются (улавливаются) вдоль полок, не распространяясь далее. Предложены приближенные аналитические зависимости для определения границ вихревых зон.

5. Численно и экспериментально установлены закономерности изменения КМС в зависимости от длин полок раструба и углов их наклона. Определены длины полок раструба и углы их наклона к оси отсоса, при которых значение КМС достигает наименьшего значения и скорость захвата местного отсоса позволяет эффективно улавливать загрязняющие вещества.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов математического моделирования отрывных течений на входе во всасывающие каналы местных отсосов-раструбов с выступом и тремя полками, получении новых закономерностей изменения характерных размеров вихревых зон и поля скоростей воздушного потока при входе в местные отсосы.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в:

- разработке компьютерных программ для определения границ вихревых зон и поля скоростей воздушных течений вблизи круглого местного отсоса-раструба с выступом (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023612659) и круглого отсоса-раструба с тремя полками (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023612661);

- определении очертаний вихревых зон на входе в отсосы с выступом и тремя полками, профилирование по которым позволит снизить их КМС и повысить эффективность захвата загрязняющих веществ;

- разработке эффективного отсоса-раструба с тремя полками с минимальным коэффициентом местного сопротивления.

Результаты исследований внедрены:

- в учебный процесс ФГБОУ ВО при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство» в «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»;

- в проектную деятельность ООО «Техэнерго» (г. Якутск) для конструирования и расчета систем вытяжной вентиляции;

- в сварочном цехе ООО «Якутский котловой завод» для улавливания сварочных аэрозолей.

Методологической основой диссертационного исследования являются численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений; методы оптимизации, анализа и обработки экспериментальных данных, регрессионного анализа, математической статистики; экспериментальные методы определения поля скоростей, местных сопротивлений и визуализации потока. Использованы специализированные программные комплексы и разработанные программы для ЭВМ.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: 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.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».

Положения, выносимые на защиту.

1. Дискретные математические модели отрывных течений на входе в круглые отсосы – раструбы с выступом и с тремя полками, их программно-алгоритмическая реализация.

2. Достоверные компьютерные модели отрывного течения при входе в отсосы-раструбы с выступами и с тремя полками в рамках модели вязкой сжимаемой жидкости в программном комплексе *SolidWorks*.

3. Закономерности изменения границ вихревых зон и распределения скорости на входе в отсосы-раструбы с выступом, в зависимости от длины выступа и угла наклона первой полки раструба. Полученные зависимости КМС от длины выступа для щелевых и круглых отсосов-раструбов, аналитические выражения для расчета их КМС.

4. Закономерности изменения длин трех полок раструба и углов их наклона, при которых обе вихревые зоны локализуются (улавливаются) вдоль полок, не распространяясь далее. Приближенные аналитические зависимости для определения границ вихревых зон.

5. Закономерности изменения КМС в зависимости от длин полок раструба и углов их наклона.

6. Конструктивное исполнение местного отсоса-раструба с тремя полками с минимальным значением КМС при эффективном улавливании загрязняющих веществ.

Достоверность результатов обоснована использованием современных методов вычислительной гидроаэродинамики и математики, подтверждается согласованностью результатов вычислительных, натурных экспериментов и данных других авторов.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования апробированы на следующих научных мероприятиях: Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н.С. Иванова (г. Якутск, СВФУ им. М.К. Аммосова, 2023); XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов практиков (г. Нижневартовск, ТИУ, 2023), 75 Международной научной конференции «Социотехническое строительство» (г. Казань, КГАСУ, 2024), научно-методических семинарах кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им. В.Г. Шухова.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из которых 4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи проиндексированы в *Web of Science* и *Scopus* (с учетом переводных изданий), 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и постановке задач диссертационного исследования, проведении литературного обзора, выборе объектов и методов исследований, 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 диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 153 наименований, 6 приложений, изложена на 154 страницах основного текста, содержит 68 рисунков, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность темы исследований и степень её разработанности, представлены цель и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость, апробация и реализация результатов исследований.

В первой главе произведен анализ методов расчета воздушных течений вблизи местных отсосов, способов повышения их эффективности. Выявлено, что нет научного обоснования применения полок и выступов в конструкциях отсосов-раструбов. Представляет интерес выявить их влияние на вихревые зоны, возникающие при входе в раструбы, коэффициент местного сопротивления (КМС) и поля скоростей вблизи местного отсоса.

Во второй главе описываются разработанные и используемые методы исследования – метод дискретных вихрей (МДВ), методы вычислительной

гидродинамики (CFD) в программном комплексе *SolidWorks*, анализа и обработки экспериментальных данных и экспериментального исследования на разработанных лабораторных установках.

Для исследования при помощи МДВ (рисунок 1) разработаны компьютерные программы для расчета отрывного течения идеальной несжимаемой жидкости, реализующие итерационную процедуру численного решения сингулярного интегрального уравнения:

$$v_n(x) = \int_S G(x, \xi) m(\xi) ds(\xi) + \gamma_1 \int_{\sigma} G(x, \xi) ds(\xi) + \gamma_2 \int_{\sigma} G(x, \xi) ds(\xi), \quad (1)$$

где $m(\xi)$ – интенсивность присоединенного вихревого слоя; γ_1, γ_2 – интенсивности свободных вихревых поверхностей, сходящихся с кромок A, B для отсоса с выступом (рисунок 1 а) или M_1, M_3 (рисунок 1 б) для отсоса с тремя полками; ξ – точка граничной поверхности S . Функция влияния $G(x, \xi)$ равна скорости среды в точке $x(x_1, x_2)$ вдоль единичного направления $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$, вызываемая вихревым бесконечно тонким кольцом единичной циркуляции с радиусом ξ_2 , удаленном от начала координат на величину ξ_1 .

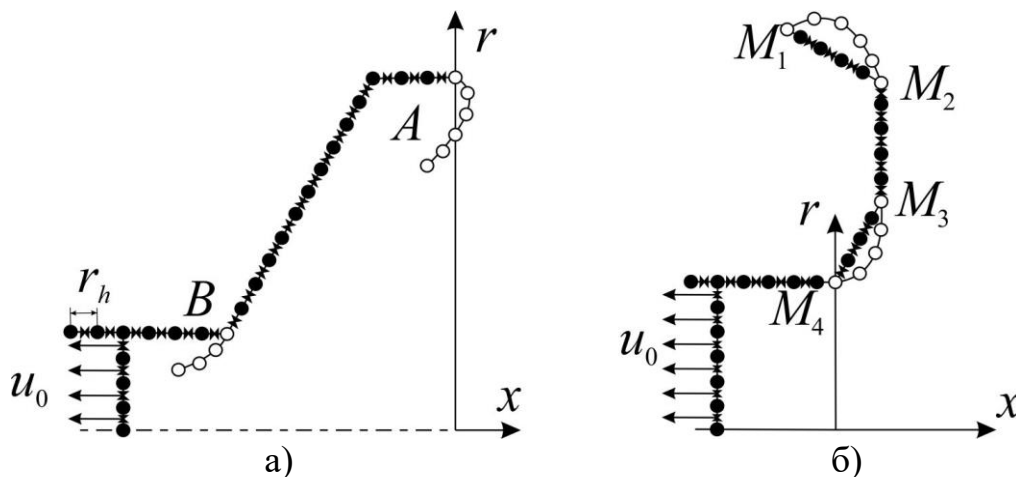


Рисунок 1 – Дискретные математические модели отсосов-раструбов:
а - с выступом; б - с тремя полками

Исследования течений к отсосам-раструбам в рамках модели вязкой сжимаемой среды проводились с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе *SolidWorks* и его CFD приложения *Flow Simulation (FloEFD)*. Для достоверности результатов численных расчетов, производились верификации моделей по КМС (рисунок 2) и валидация при помощи сравнений с величинами опытных данных скорости среды и КМС.

Для проведения экспериментальных исследований и подтверждения численных результатов, была разработана лабораторная установка (рисунок 3), описаны методики обработки результатов экспериментальных данных, получения регрессионных зависимостей и метод покоординатного спуска для определения минимального КМС.

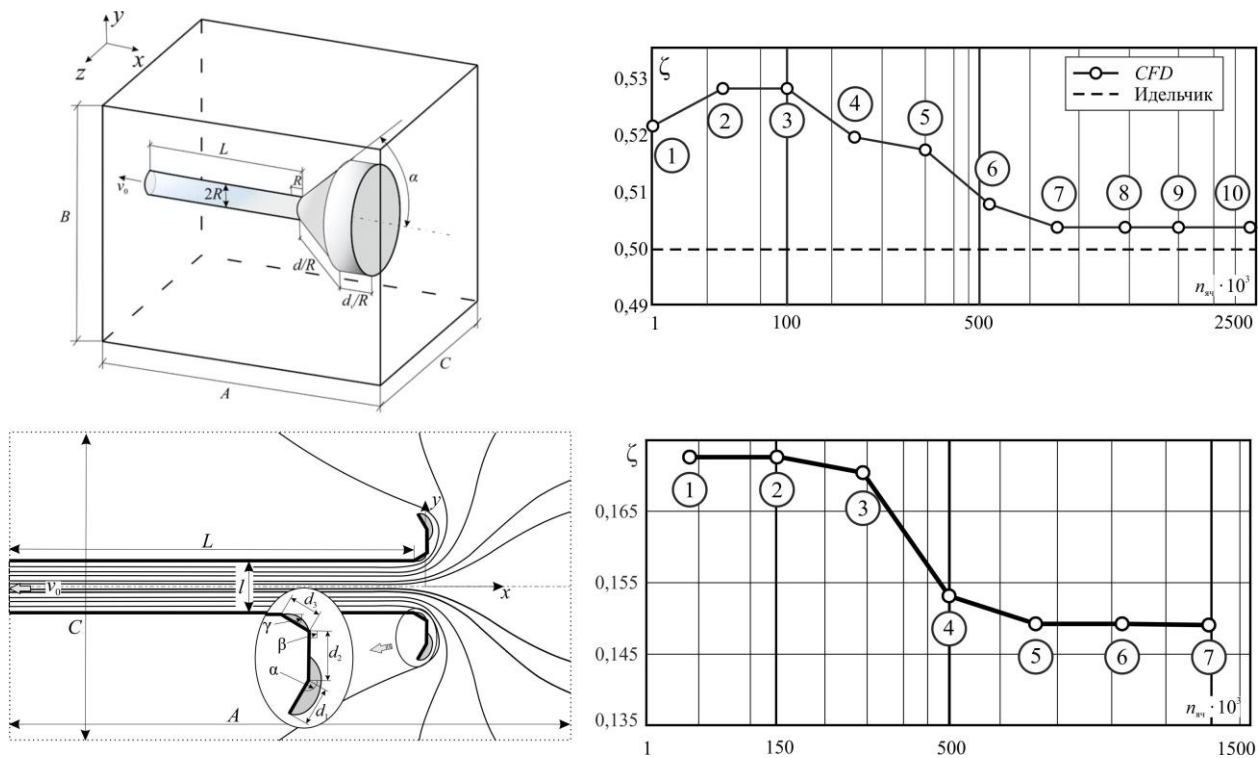


Рисунок 2 – Геометрии расчетных областей (слева) и зависимости изменения КМС (справа): а – для круглого отсоса-раструба с выступом; б – для круглого отсоса-раструба с тремя полками)

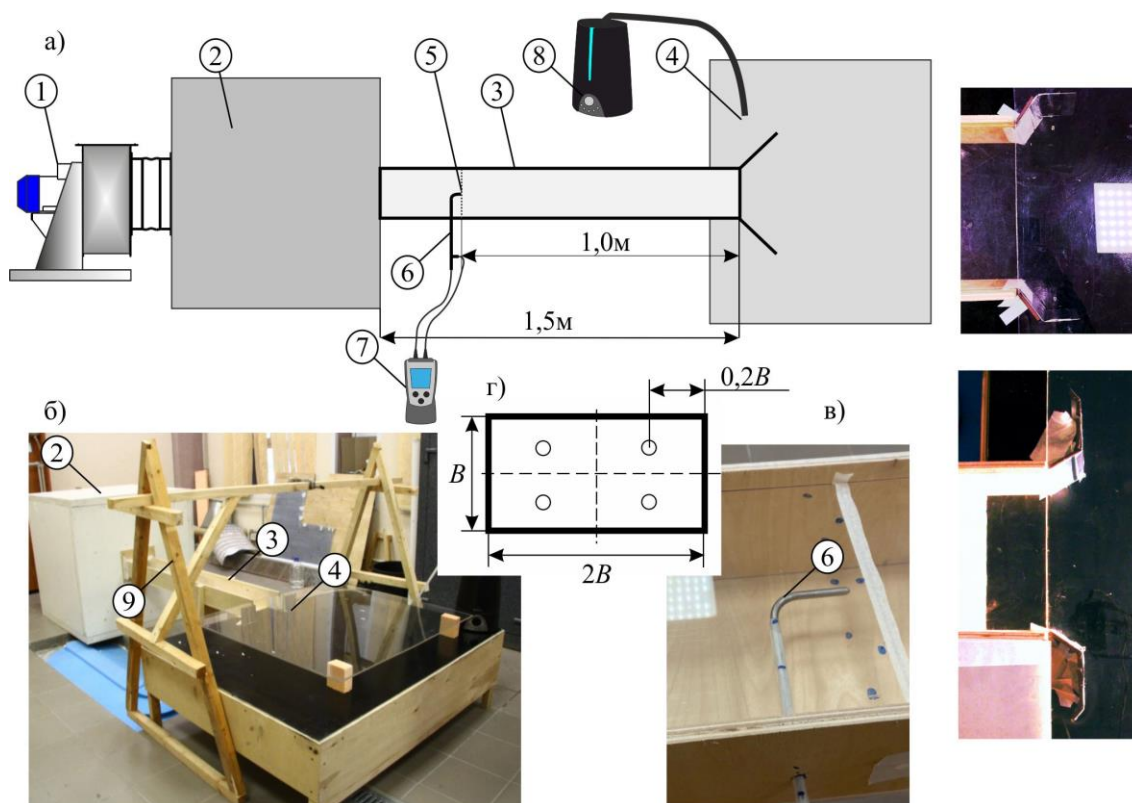


Рисунок 3 - Экспериментальная установка: а) схема; б) фото установки; в) фото места замера; г) схема точек замера (1 – вентилятор; 2 – камера статического давления; 3 – воздуховод 100×200; 4 – испытательный участок в виде щелевого канала, накрыт сверху органическим стеклом; 5 – измерительное сечение; 6 - трубка Пито-Прандтля; 7 – дифференциальный манометр Testo-510; 8 – ультразвуковой увлажнитель воздуха Polaris; 9 – деревянная стойка для фотоаппарата.

В третьей главе приведены результаты численных и экспериментальных исследований для отсосов-раструбов длиной $d = 2, 3$ и 5 калибров (калибр - радиус всасывающего патрубка) с выступами $d_v = 0,5, 1$ и 2 .

Из результатов численных исследований методами МДВ и *CFD*, следует, что наличие выступа снижает скорость захвата отсоса при увеличении длины выступа. Размеры первой ВЗ, образующейся при срыве потока из точки A раструба, существенно возрастают при увеличении d_v . Это верно для всех рассмотренных углов наклона раструбов: $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ (рисунок 4).

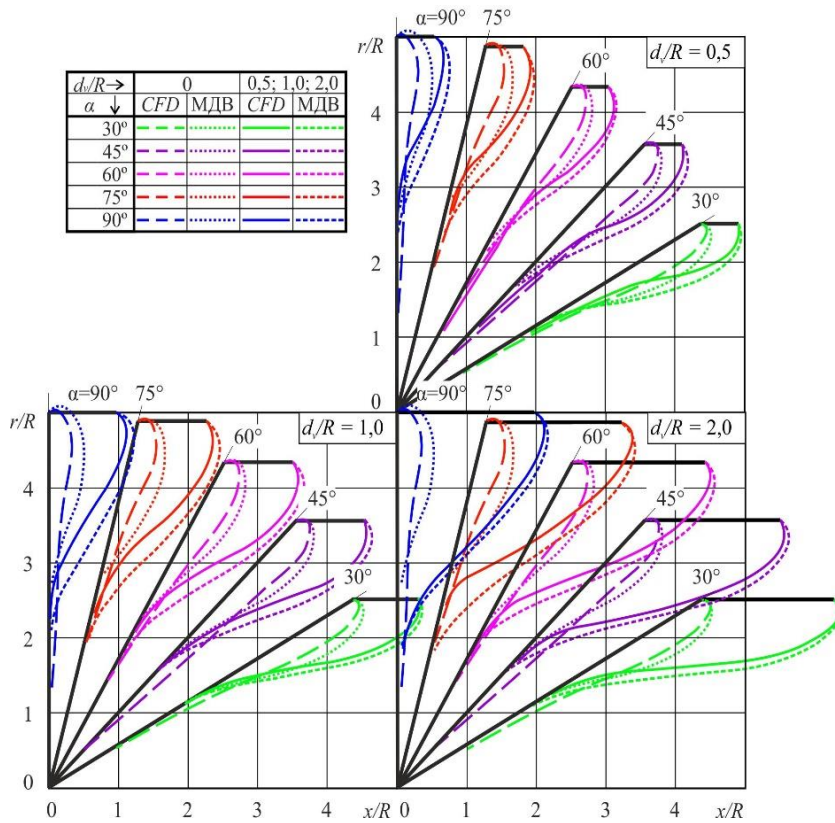


Рисунок 4 - Сравнение очертаний первой вихревой зоны на входе в круглый отсос-раструб при разных углах наклона, для длин выступа $d_v/R = 0,5; 1; 2$.

для определения КМС (ζ) при условиях угла наклона раструба $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ (где α – угол в радианах от $\pi/6$ до $\pi/2$), длин выступа $0 \leq d_v/R \leq 2$ и длин раструба $2 \leq d/R \leq 5$.

Зависимость ζ щелевого отсоса-раструба с выступом по найденным экспериментальным значениям:

$$\zeta = 0,1908 - 0,102\alpha - 0,0264d/R + 0,0425d_v/R + 0,0168\alpha d/R - 0,0521\alpha d_v/R + 0,0123dd_v/R^2 + 0,1248\alpha^2 - 0,0195(d_v/R)^2, \quad (2)$$

Зависимость ζ щелевого отсоса-раструба с выступом по найденным численным значениям:

$$\zeta = 0,1783 - 0,1615\alpha - 0,0065d/R - 0,0038d_v/R + 0,0017\alpha d/R - 0,0088\alpha d_v/R + 0,0007dd_v/R^2 + 0,1858\alpha^2 + 0,0006(d/R)^2 + 0,0020(d_v/R)^2, \quad (3)$$

Зависимости КМС входа в раструб от длин раструба и выступа при разных углах наклона раструба были определены на разработанной экспериментальной установке (рисунок 3) и численно при помощи *CFD*. Наличие выступа позволяет снизить КМС, что при постоянной мощности вентилятора увеличивает расход удаляемого воздуха. В результате обработки результатов экспериментальных и расчетных величин КМС, методом наименьших квадратов получены аналитические зависимости

Зависимость ζ круглого отсоса-раструба с выступом по найденным численным значениям):

$$\zeta = -0,1123 + 0,32\alpha + 0,043d/R + 0,0021d_v/R - 0,0001\alpha d/R - 0,0056\alpha d_v/R - 0,0002dd_v/R^2 + 0,0164\alpha^2 - 0,0055(d/R)^2 - 0,0001(d_v/R)^2, \quad (4)$$

В четвертой главе приводятся результаты исследований и конструирования энергоэффективного местного отсоса-раструба с применением трех полок.

По результатам численного исследования МДВ были определены очертания вихревых зон при разных длинах и углах наклона полок. По найденным границам вихревых зон можно спрофилировать раструб, что позволит еще более снизить КМС и предотвратить вынос загрязняющих веществ из зоны вихреобразования.

При помощи метода покоординатного спуска, численного и натурного эксперимента, произведен поиск минимума функции КМС (рисунок 5):

$$\zeta = f(\alpha, \beta, \gamma, d_1/l, d_2/l, d_3/l). \quad (5)$$

Угол наклона второй полки β постоянен и равен 90° поскольку это способствует увеличению дальности захвата отсоса. В начале фиксируются все переменные, кроме одной, определяется ее величина, при которой ζ принимает минимальное значение. Далее при найденном значении переменной изменяется другая величина, все остальные переменные фиксируются. После определения величины второй переменной, при которой ζ минимален переходим к поиску минимума по третьей переменной, и т.д. В начале была определена величина угла $\gamma = 30^\circ$ (1).

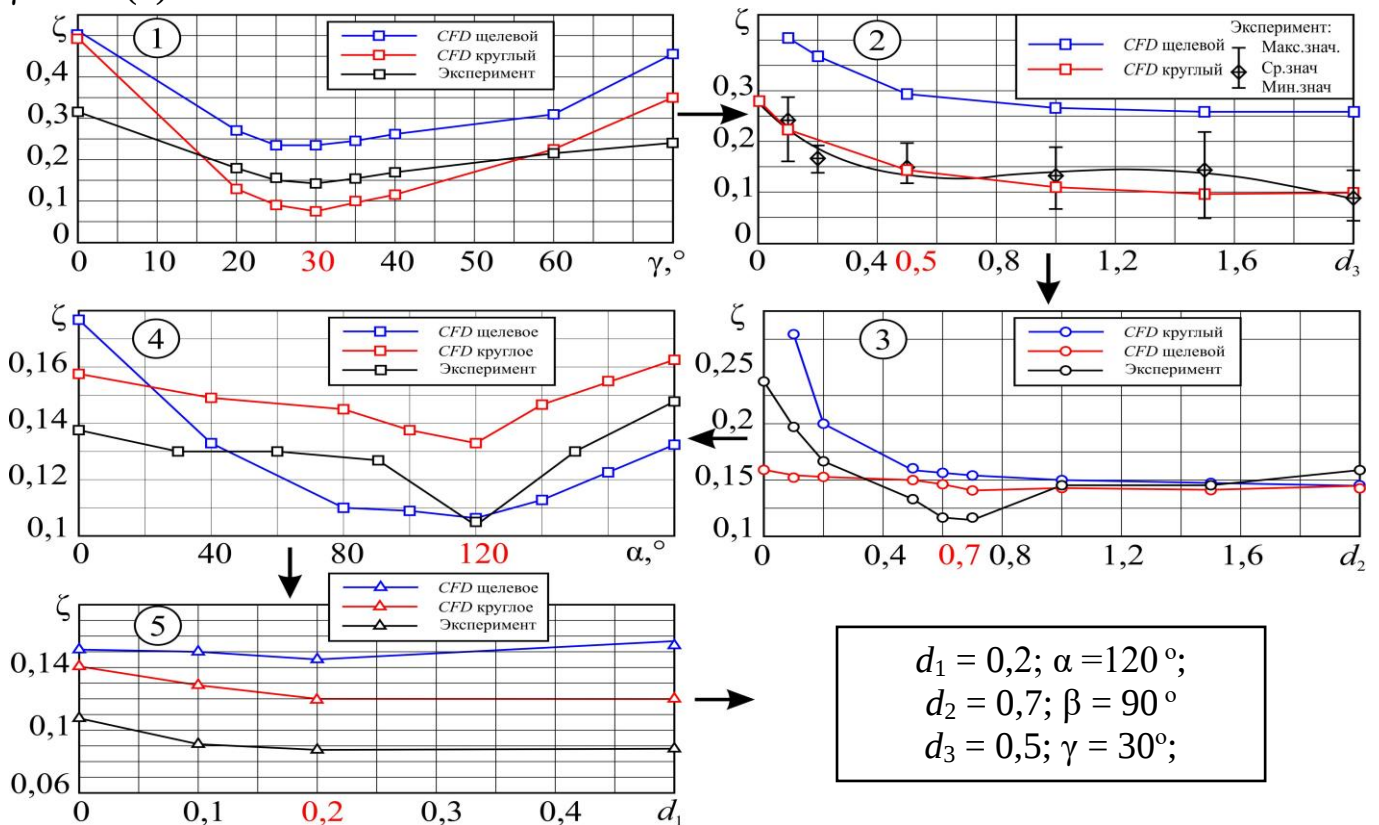


Рисунок 5 – Графики изменения значения ζ : 1 - от угла $\gamma = 30^\circ$; 2 - от длины полки d_3 ; 3 - от длины полки d_2 ; 4 - угла наклона α ; 5 - от длины полки d_1

Далее последовательно определялись величина $d_3 = 0,5$ (2); длина $d_2 = 0,7$ (3); угол наклона $\alpha = 120^\circ$ (4) и длина $d_1 = 0,2$ (5). Величины ζ определялись численно методом *CFD* для круглых и щелевых отсосов – раструбов с тремя полками и при помощи натурного эксперимента для щелевого отсоса – раструба с тремя полками.

Проведена проверка воспроизводимости результатов опытов по определению КМС. Проведена серия одних и тех же экспериментов ($n = 6$) по определению КМС для шести длин $d_1 = 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2$ калибров ($k = 6$) на рисунке 5 (2). Полученное значение критерия Кохрена $G_p = 0,349$ сравнивается с табличным теоретическим значением $G_t = 0,445$ при вероятности $P = 0,95$. Выполнение условия $G_p = 0,349 < G_t = 0,445$ показывает воспроизводимость опытов. Полученные экспериментальные значения КМС были аппроксимированы при помощи метода наименьших квадратов следующим уравнением:

$$\zeta = 0,28058 - 0,61502d_1 / R + 0,853765d_1 / R^2 - 0,460311d_1 / R^3 + 0,08161d_1 / R^4, \quad (6)$$

Кривая, построенная по этой формуле, выделена черным цветом на рисунке 6,б.

Согласно натурному эксперименту наименьшее значение КМС $\zeta = 0,088$, по результатам численного расчета для круглого отсоса-раструба стремя полками: $\zeta = 0,120$, а для щелевого – $\zeta = 0,145$.

Для выявления эффективности захвата загрязняющих веществ круглым отсосом-раструбом с тремя полками были построены зависимости безразмерных величин горизонтальной и вертикальной (радиальной) составляющей скорости $v = \{v_x, v_y\}$ (рисунок 6) в сравнении с отсосом-раструбом длиной $d = d_1 + d_2 + d_3 = 1,4$ и углом наклона 90° (далее - отсос с фланцем). Осевая составляющая скорости (v_x/v_0) для отсоса с фланцем несколько выше на расстояниях от оси отсоса (в направлении y/R) до 1 калибра. На расстояниях $y/R > 1$, напротив, скорость выше у отсоса с тремя полками (рисунок 7, а). Для радиальной составляющей скорости v_y/v_0 (рисунок 7, б) наблюдается примерно такая же картина – на расстояниях до 1-2 калибров от оси скорость для отсоса с фланцем выше, для $y/R > 1 \div 2$ становится выше скорость для отсоса с тремя полками. Найденные величины скорости достаточно близки, но при этом для отсоса с тремя полками ζ снижается более чем в три раза.

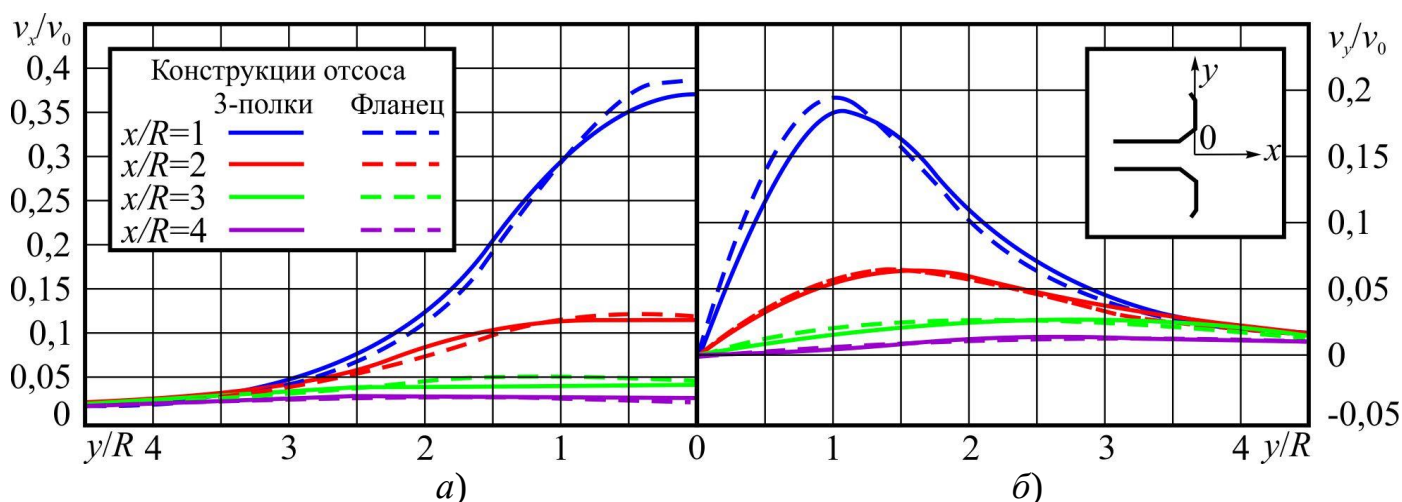


Рисунок 6 - Профили осевой и радиальной составляющей скорости.

При одинаковом значении статического давления равного 101208 Па получены размерные значения осевой скорости при подтекании к отсосам-раструбам с тремя полками и с фланцем, полученные численно методами *CFD* и при помощи эксперимента (рисунок 7, а). Наибольшая осевая скорость v_a достигается в отсосе-раструбе с фланцем при удалении от входа в раструб на расстояние $x < 0,2$ м, что связано с влиянием отрыва потока, приводящего к заужению эффективного сечения всасывания и соответственно увеличению скорости в центральной части. При $x > 0,2$ м наибольшая величина v_a наблюдается у отсоса-раструба с тремя полками. Расчеты, выполненные в *CFD* близки к экспериментальным данным. Для круглого отсоса осевая скорость изменяется аналогично.

Отрывные течения на входе во всасывающее отверстие разделяются на две зоны (рисунок 7, б). Границы вихревых зон, полученных методом *CFD* и дискретных вихрей близки между собой. Вторая вихревая зона (рисунок 7, в) полностью локализована вблизи полки d_3 , она не проникает дальше в вытяжной канал. Именно это и дает возможность снизить КМС. Уменьшается вихревая зона и при отрыве потока с острой кромки d_1 , но не полностью локализуется вдоль полки. Увеличивая длину полки d_3 можно добиться, чтобы вихревая зона полностью прилегала к этой полке, но как показал эксперимент, значение КМС перестает уменьшаться, начиная с $d_3 = 0,2$, поэтому дальнейшее увеличение длины полки нецелесообразно. Очевидно, это связано с малыми скоростями воздушного течения вблизи полки d_3 , поэтому главное влияние на КМС оказывает вторая вихревая зона, которая локализована вблизи полки d_1 , где скорость воздуха значительно выше.

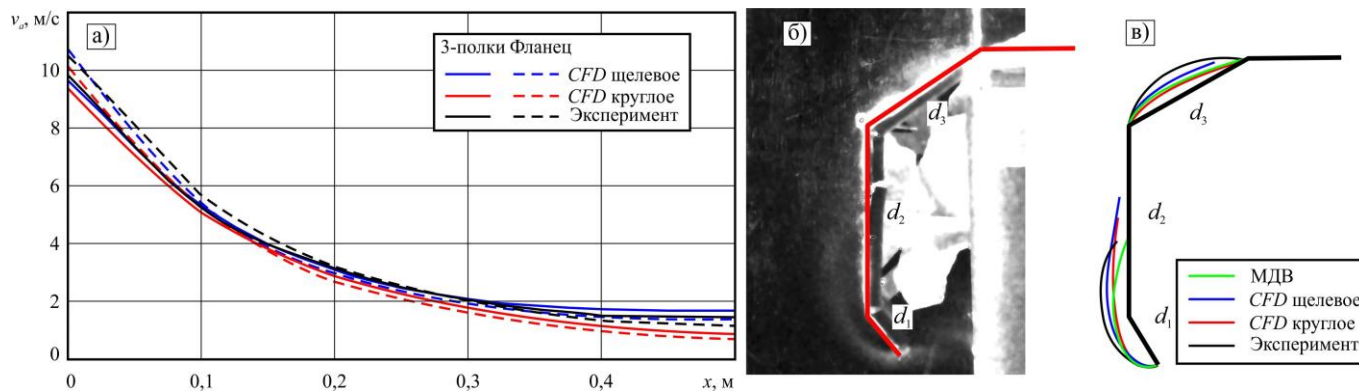


Рисунок 7 - График осевой скорости при подтекании воздуха к отсоса-раструбу (а) и вихревые зоны на входе отсос-раструб с тремя полками

В пятой главе представлены результаты практического применения разработанного в ходе исследования конструкции местного отсоса-раструба с тремя полками.

Натурные испытания проводились для системы вытяжной вентиляции стола сварки и резки металлов в Якутском котловом заводе (ООО «ЯКЗ»), для данной установки была распечатана на 3D принтере конструкция круглого отсоса-раструба с тремя полками (рисунок 8).

При использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками потери давления в канале снижаются на 21%, а после отсоса-раструба в гибком воздуховоде – на 55%. Скорость воздуха в канале повышается на 0,1 м/с, расход воздуха

увеличился на 1,5%, КМС удалось снизить на 50%. Увеличивается скорость захвата загрязняющих веществ, наибольшая осевая составляющая скорости v_a (рисунок 9) достигается у круглого отсоса-раструба с тремя полками на близких расстояниях до $x \geq 0,2$ м.

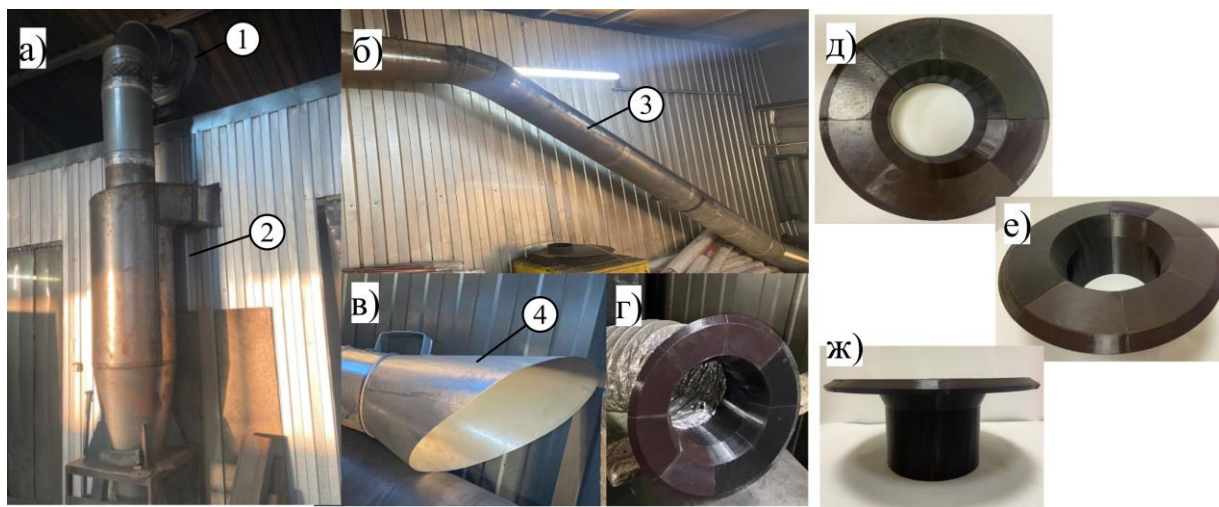


Рисунок 8 – Фото установки и отсоса-раструба с тремя полками: а) вентилятор и циклон; б) воздуховод; в и г – испытательные участки; д) вид сверху; е) вид изометрией; ж) вид сбоку (1 – радиальный вентилятор; 2 – циклон ЦН-11-400П; 3 – круглый воздуховод диаметром 200 мм; 4 – отсос-раструб)

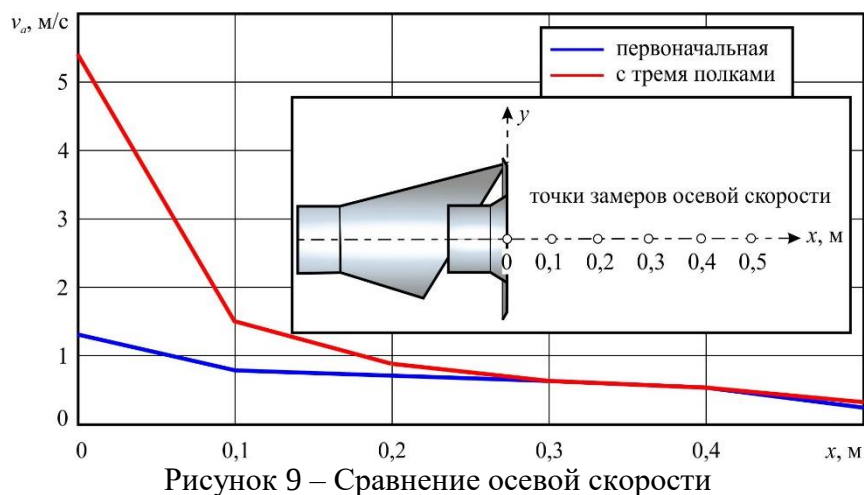


Рисунок 9 – Сравнение осевой скорости

Выполнены технико- и социально-экономические расчеты при применении круглого отсоса-раструба с тремя полками в сварочном цехе котлового завода. Установлено, что при внедрении конструкции местного отсоса потребление электроэнергии снизится на 4% (2063,57 руб./год) на одно на одно рабочее место, в сравнении с существующим

отсосом-раструбом. Разработанная конструкция принята к внедрению для эксплуатации на двенадцати сварочных постах котлового завода ООО «ЯКЗ» в г. Якутске.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача снижения аэродинамического сопротивления местного отсоса в виде раструба с несколькими полками за счет рационального выбора их геометрических параметров при сохранении эффективности улавливания загрязняющих веществ.

Итоги выполненного исследования

1. Предложено и обосновано конструктивное исполнение отсоса-раструба с тремя полками, при котором удалось сохранить дальность захвата вредных веществ, снизить коэффициент местного сопротивления и энергоемкость.

2. Разработаны дискретные математические модели отрывных течений на входе в круглые отсосы – раструбы с выступом и с тремя полками. Разработана программно-алгоритмическая реализация данных моделей, компьютерные программы зарегистрированы в Роспатенте.

3. Разработаны компьютерные модели отрывного течения при входе в отсосы-раструбы с выступами и с тремя полками в рамках модели вязкой сжимаемой жидкости в программном комплексе *SolidWorks*. Доказана сеточная сходимость компьютерных моделей по параметру КМС.

4. Разработаны лабораторные установки для исследования щелевых отсосов-раструбов с выступом и с тремя полками. Доказана воспроизводимость опытов по определению КМС при помощи критерия Кохрена по серии параллельных опытов.

5. По разработанной компьютерной программе, основанной на итерационной вычислительной процедуре и использовании стационарных дискретных кольцевых вихрей, определены границы вихревых зон, возникающих на входе в отсосы-раструбы с выступом. Установлено, что с увеличением длины выступа, размеры первой вихревой зоны возрастают. Размеры второй вихревой зоны для длинных отсосов-раструбов не изменяются. Скорость захвата на оси отсоса для углов наклона раструба 30° , 45° , 60° , 75° , 90° снижается при увеличении длины выступа. Наибольшая скорость захвата достигается для отсоса-раструба без выступа.

Проведена валидация компьютерной модели вязкой сжимаемой жидкости в программе *SolidWorks*. Выполнено сравнение расчетного поля скоростей и очертаний вихревых зон вблизи отсосов-раструбов без выступа. Более близки к экспериментальным данным поля скоростей и линии отрыва потока, рассчитанные по методу дискретных вихрей. Расчеты методом *CFD* в программном комплексе *SolidWorks*, имеют несколько большее расхождение, однако по статистическим критериям также достоверны и адекватны, кроме того, данная модель позволяет определить значения коэффициентов местного сопротивления на входе в отсосы.

В результате моделирования отрывного течения на входе в отсос с раструбом, длиной 5 калибров, углов его наклона 90° , 75° , 60° , 45° , 30° , длин выступов $d_v / R = 0$; 0,5; 1; 2, обоими методами выявлен рост первой вихревой зоны при увеличении длины выступа, а также падение скорости захвата местным отсосом-раструбом.

Проведены натурные испытания и вычислительные эксперименты по определению зависимости КМС от длины выступа для щелевых и круглых отсосов-раструбов. Получены аналитические выражения для расчета КМС для круглых и щелевых отсосов с выступами. В основном, для рассматриваемого диапазона длин раструбов и углов их наклона, наблюдается снижение сопротивления при росте длины выступа. При использовании отсосов-раструбов с выступами, необходимо учитывать, что помимо снижения сопротивления, снижается скорость захвата загрязняющих веществ отсосом.

6. По разработанному вычислительному алгоритму с использованием дискретных вихревых колец составлена компьютерная программа и рассчитаны размеры отсоса-раструба, состоящего из трех полок. При данных размерах образуются две вихревые зоны с длинами, равными длинам, прилегающим к ним полкам, границы которых образуют плавную линию, в том числе в местах изломов раструба. Найдены закономерности изменения длин полок и углов их наклона, при которых обе вихревые зоны локализуется (улавливаются) вдоль полок, не распространяясь далее. Предложены приближенные аналитические зависимости для определения границ вихревых зон. Профилирование по найденным границам вихревых зон позволит исключить вихреобразование, снизить КМС входа в раструб и повторный вынос уловленных загрязняющих веществ, циркулирующих в этих вихревых зонах.

В программном комплексе *Solidworks*, в модуле *Flow Simulation (FloEFD)* численно, а также экспериментально выявлены закономерности изменения КМС в зависимости от длин полок раструба и углов их наклона. При помощи метода покоординатного спуска определены длины полок раструба и углы наклона их к оси отсоса, при которых значение КМС достигает наименьшего значения: длина третьей полки $d_3 = 0,5l$ (l – характерный линейный размер: полуширина щелевого отсоса B или радиус R для круглого отсоса), угол наклона этой полки $\gamma = 30^\circ$, она примыкает ко входу во всасывающий канал; длина второй полки $d_2 = 0,7l$, устанавливается перпендикулярно оси отсоса ($\beta = 90^\circ$), соединена с первой и третьей полками; длина первой полки $d_1 = 0,2l$, угол наклона $\alpha = 120^\circ$. Величина КМС отсоса с тремя полками снижается от 3 до 5 раз по сравнению с КМС отсоса с фланцем (раструб установлен перпендикулярно оси отсоса, КМС $\zeta = 0,5$). Согласно натурному эксперименту, наименьшее полученное значение КМС для разработанной конструкции щелевого отсоса с тремя полками, составляет $\zeta = 0,088$, по результатам численного расчета для круглого отсоса-раструба с тремя полками: $\zeta = 0,128$, а для щелевого – $\zeta = 0,145$.

Сравнение поля скоростей трехполочного отсоса и отсоса с фланцем показывает, что его скорость захвата выше, чем у отсоса с фланцем на расстояниях более 1 калибра (величины l) от отсоса.

Очертания вихревых зон определены экспериментально и численно. При этом дополнительно использовался метод дискретных бесконечно тонких вихревых колец без самоиндукции. Границы вихревых зон, полученных методом *CFD* и дискретных вихрей, хорошо коррелируют между собой. Вторая вихревая зона локализуется вблизи полки d_3 , что и дает возможность снизить КМС. Первая вихревая зона, образующая с острой кромки d_1 , не полностью локализуется вблизи этой полки, но оказывает не столь существенное влияние на КМС.

7. Разработанный, на основе результатов численных и экспериментальных исследований, местный отсос-раструб с тремя полками внедрен на Якутском котловом заводе (ООО «ЯКЗ»). При применении круглого отсоса-раструба с тремя полками удалось снизить потери давления в сети на 20% и повысить скорость захвата загрязняющих веществ.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в деятельность предприятий при

проектировании, строительстве и эксплуатации систем местной вытяжной вентиляции.

Перспективы дальнейшей разработки темы: определение влияния на вихревые зоны при входе во всасывающие каналы с раструбами набегающих, сносящих, тепловых, пульсирующих пылегазовых потоков и установление закономерностей эффективности улавливания загрязняющих веществ местными отсосами под воздействием различных указанных возмущений.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus*

1. *Аверкова, О.А.* Моделирование отрыва потока при входе в круглые отсосы с выступом / Аверкова О.А., Логачёв К.И., **Козлов Т.А.**, Попов Е.Н. // Новые огнеупоры. - 2022. - №4. - С. 65-70. (*Averkova, O.A. Simulation of Flow Separation at the Entrance to Round Exhaust Hoods with a Protrusion. / Averkova, O.A., Logachev, K.I., Kozlov, T.A., Popov, E.N // Refractories and Industrial Ceramics. – 2022 - Vol. 63, P.235–240).*

2. *Аверкова, О.А.* Численный расчет границ вихревых зон при входе в круглые отсосы- раструбы с тремя полками / Аверкова О.А., Логачев К.И., **Козлов Т.А.**, Попов Е.Н., Дмитриенко В.Г. // Новые огнеупоры. - 2022. - №12. - С. 58-63. (*Averkova, O.A. Numerical calculation of the boundaries of vortex zones at the entrance to round suction tubes with three shelves. / Averkova O.A., Logachev K.I., Kozlov T.A., Popov E.N., Dmitrienko V.G. // Refractories and Industrial Ceramics. – 2023 – Vol. 63, P.681–686).*

3. *Logachev, K.I.* Developing a mathematical simulation method for three-dimensional separated airflow at inlet of local exhaust devices / Logachev K.I., Ziganshin A.M., Huang Y., Wang Y., Averkova O.A., Popov E.N., **Kozlov T.A.** // Journal of Building Engineering. – 2023 – Volume 63, 105490.

4. *Логачев, К.И.* Моделирование отрывного воздушного потока при входе в квадратный отсос сообщение 1. Методы исследования / К. И. Логачев, Е. Н. Попов, **Т. А. Козлов** [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 6(774). – С. 39-53.

5. *Логачев, К.И.* Моделирование отрывного воздушного потока при входе в квадратный отсос сообщение 2. Результаты расчета и их обсуждение / К. И. Логачев, Е. Н. Попов, **Т. А. Козлов** [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 7(775). – С. 61-71.

В сборниках трудов конференций

6. **Козлов, Т. А.** Снижение сопротивления в местных отсосах с применением метода дискретных вихрей / Т. А. Козлов, Е. Н. Попов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная

170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 6. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 118-122.

7. **Козлов, Т. А.** CFD моделирование воздушных течений при входе в круглый местный отсос с выступом / Т. А. Козлов // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (Тэгуа-2023): Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н.С. Иванова, Якутск, 06–09 декабря 2023 года. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2023. – С. 67-68.

8. **Козлов, Т.А.** Численное определение сопротивления отсоса-раструба при разных размерах выступа и углах раскрытия // Инновационные процессы в науке и технике XXI века. Материалы XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов практиков (Нижевартовск 21 апреля 2023 г.) Том 3. - Тюмень: ТИУ, 2023. - С. 197-200.

Объекты интеллектуальной собственности

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023614016. Расчет границ вихревых зон при входе в круглый отсос-раструб с выступом: Заявка №2023612569 от 13.02.2023 г; опубликовано 21.02.2023 / Аверкова О.А., Логачёв К.И., Тирон О.В., **Козлов Т.А.**; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023613911. Определение границ вихревых зон при входе в круглые отсосы-раструбы с тремя полками: Заявка №2023612661 от 13.02.2023 г; опубликовано 21.02.2023 / Аверкова О.А., Логачёв К.И., Тирон О.В., **Козлов Т.А.**; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВХОДЕ
В МЕСТНЫЕ ОТСОСЫ-РАСТРУБЫ С СОСТАВНЫМИ ПОЛКАМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.04.2024 г. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 1,05 Тираж 100 экз. Заказ № 55

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46