

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

На правах рукописи



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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Попов Евгений Николаевич

Белгород 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ МЕСТНЫЕ ОТСОСЫ ОТКРЫТОГО ТИПА И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	12
1.1 Повышение эффективности элементов систем механической вентиляции..	12
1.2 Местные отсосы открытого типа, требования к ним	21
1.3 Вихревые зоны и аэродинамические сопротивления. Методы расчета отрывных течений на входе во всасывающие каналы	28
1.4 Выводы по первой главе.....	45
2 ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ С РАСТРУБАМИ С СОСТАВНЫМИ ПОЛКАМИ.....	46
2.1 Численное моделирование отрыва потока методом дискретных вихрей	46
2.2 Численное моделирование в комплексе <i>SolidWorks</i>	49
2.3 Описание экспериментальной установки и методов измерения.....	54
2.4 Метод многомерной оптимизации методом покоординатного спуска	57
2.5 Обработка экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей.....	58
2.6 Выводы по второй главе	65
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВА ПОТОКА ПРИ ВХОДЕ В ВЫТЯЖНЫЕ ЗОНТЫ С ВЫСТУПОМ.....	67
3.1 Численное моделирование отрыва потока методом дискретных вихрей	67
3.2 Численное моделирование отрыва потока методом <i>CFD</i>	72
3.3 Экспериментальное определение коэффициента сопротивления	78
3.4 Выводы по третьей главе.....	84
4 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВХОДЕ В ОТСОСЫ-РАСТРУБЫ С ТРЕМЯ ПОЛКАМИ.....	86
4.1 Численное моделирование при помощи метода дискретных вихрей.....	86
4.2 Численное моделирование в комплексе <i>SolidWorks</i>	94

4.2.1 Поиск минимума КМС методом покоординатного спуска	94
4.2.2 Поиск оптимальной по величине КМС конструкции отсоса	95
4.3 Распределение скоростей вблизи отсоса	99
4.4 Очертания вихревых зон на входе в отсос	101
4.5 Выводы по четвертой главе.....	103
5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ	
ОТСОСА-РАСТРУБА	105
5.1 Промышленный эксперимент в ООО «Якутский котловой завод».....	105
5.2 Описание системы вытяжной вентиляции, приборная база	106
5.3 Результаты замеров и обсуждение	110
5.4 Техничко-экономическое обоснование.....	111
5.5 Выводы по пятой главе.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЯ	138
Приложение А Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ	138
Приложение Б Акт внедрения местного отсоса-раструба с тремя полками.....	140
Приложение В Акт промышленных испытаний	141
Приложение Г Акт внедрения в проектную деятельность программных продуктов для проектирования и расчета систем вытяжной вентиляции	142
Приложение Д Акт внедрения в учебную деятельность.....	143
Приложение Е Результаты замеров натурных экспериментов	144

ВВЕДЕНИЕ

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 полук 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 (полок раструба), которые, как утверждается в ряде источников, повышают их эффективность или используются в технологических целях – для установки креплений, для подвеса зонта или установки жиρούловителей 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 локализуются 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 уставлены 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. Используются 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 155 страницах основного текста, содержит 69 рисунков, 10 таблиц.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ МЕСТНЫЕ ОТСОСЫ ОТКРЫТОГО ТИПА И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

1.1 Повышение эффективности элементов систем механической вентиляции

Системы вентиляции предназначены для подачи чистого и удаления загрязненного воздуха с целью обеспечения нормируемых параметров воздушной среды в рабочей или обслуживаемой зоне помещения.

Местный отсос, один из главных элементов местной вытяжной вентиляции [1, 2], который широко используется для удаления вредных веществ, тепловых потоков [3, 4], сварочных дымов [5], пылевых аэрозолей [6, 7], газов [8, 9], химических веществ [10] от мест их образования в промышленных и гражданских зданиях.

Применение местных отсосов снижает негативное воздействие вредных веществ на здоровье работников и производственное оборудование [11, 12], улучшает качество воздуха в рабочей зоне помещения, уменьшает негативное влияние загрязняющих веществ на окружающую среду, способствует повышению производительности и эффективности труда. Правильное проектирование, установка и обслуживание местного отсоса имеют особое значение для обеспечения его эффективной работы [13, 14].

Местные отсосы необходимо размещать как можно ближе к источникам образования загрязняющих веществ. Конструкции местных отсосов бывают весьма разнообразны вследствие большого разнообразия технологических процессов. По степени изоляции от окружающего пространства, выделяют отсосы открытого и закрытого типа [29]. Отсосы открытого типа находятся вне зоны выделения загрязняющих веществ, к ним могут относиться вытяжные зонты, панели, бортовые, щелевые отсосы. Отсосы закрытого типа полностью охватывают зону выделения загрязняющих веществ. Можно

выделить такие их виды: аспирационные и фасонные укрытия, вытяжные камеры и шкафы и т.д.

Несмотря на высокую эффективность местной вытяжной вентиляции по локализации и улавливанию загрязняющих веществ, остается актуальной проблемой эффективность улавливания вредных веществ открытыми зонтами, а также снижение энергозатрат на эксплуатацию всей системы [15]. Для снижения энергоёмкости систем местной вытяжной вентиляции исследуют и используют свойства отрывных [16, 17], вихревых [18, 19], рециркуляционных [20], закрученных [21] и конвективных [15, 22] воздушных потоков, а также и поведение пылевых частиц в них [23]. Ученые БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия), КГАСУ (Казань, Россия) а также в Xi'an University of Architecture and Technology (Сиань, КНР) активно развивают научное направление по снижению потерь давления в системах механической вентиляции за счет профилирования входных проемов вытяжных устройств [24] или фасонных элементов вентиляционных систем [25]. Для сглаживания границ течения и снижения местных сопротивлений изучают очертания вихревых зон в местах деформации потока [26, 27] или природные аналогии [28]. По найденным очертаниям осуществляют профилирование фасонных элементов и значительно снижают коэффициент местных сопротивлений и соответственно потери давления в системах вентиляции.

Вытяжные зонты или раструбы, являются одними из основных элементов местных вытяжных вентиляционных систем. Они имеют круглую, квадратную, щелевую или прямоугольную формы.

Представляет интерес исследование и совершенствование конструкции открытых отсосов, поскольку необходимость улавливания загрязняющих веществ устройствами данного типа стоит наиболее остро. При проектировании отсосов открытого типа, зачастую пренебрегают влиянием вихревых зон, возникающих на внешних краях и изломах зонтов.

Вопросы исследования течений и способы повышения эффективности действия систем местной вытяжной вентиляции посвящены работы многих

отечественных и зарубежных ученых: 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. Проводились экспериментальные и численные исследования поля скоростей перед вытяжным отверстием, сопротивления входных участков и определения очертаний вихревых зон при срыве потока с острых кромок.

Важное практическое значение имеет работа А.М. Зиганшина [30], в которой исследуются отрывные течения в воздуховодах и патрубках, описываются очертания вихревых зон и их влияние на аэродинамическое сопротивление фасонных элементов вентиляционных систем.

В работе А.К. Логачева проводилось экспериментальное исследование отрывных течений вблизи круглых отсосов и совершенствование методов расчета их параметров [31]. Так же, известна работа А.И. Пузанок, в которой выполнялось численное моделирование вихревых нестационарных пылегазовых течений в системах местной вытяжной вентиляции [32].

Эффективность вытяжных зонтов по улавливанию загрязняющих веществ влияет на качество воздуха в помещении и энергопотребление систем вентиляции в промышленных и гражданских зданиях [33]. Одним из способов повышения эффективности улавливания загрязняющих веществ является использование приточных воздушных струй. Использование воздушной завесы позволило повысить эффективность улавливания капель различного диаметра [34]. В статье [35] изучалось влияние экранирующей струи на осевую скорость прямоугольного вытяжного устройства (рисунок 1.1). Предложен новый тип улучшенного вытяжного зонта, использующий прямоугольное отверстие вместо круглого в вытяжном устройстве *Aaberg*. Новая система вентиляции, сочетающая в себе приточную и рециркуляционную вентиляцию предложена в статье [36]. Вихревая

вентиляция, также основана на использовании приточных струй и представляет значительный интерес для исследователей [37]. Вместе с тем, не отрицая эффективность приточно-вытяжных систем вентиляции, заметим, что в этих системах также можно было бы рассмотреть возможность снижения местных сопротивлений в вентиляционных системах и её элементах.

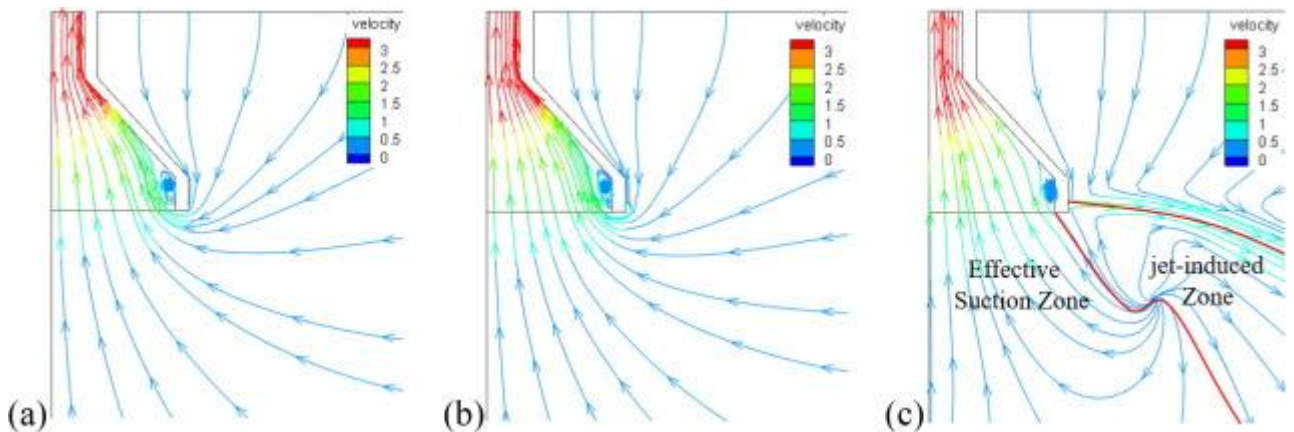


Рисунок 1.1 - Линии тока, подтекающие к местному отсосу: а – без струи, b – с короткозамкнутой струей, с – со струей критической скорости

Во многих работах используются различные методы оптимизации. В статье [38] в качестве предмета для оптимизации выбрана конструкция пылеулавливающего кожуха. Оптимизируется производительность вытяжной системы при помощи метода поверхности отклика (*RSM*), где удалось повысить эффективность и снизить концентрации пыли в месте шлифования на 83,6%.

В исследовании [39] предложен метод, основанный на улучшенном методе оптимизации топологии и модифицированном уравнении Бринкмана. В качестве примера оптимизации рассмотрен тройник воздуховода. Результаты показывают, что снижение сопротивления за счет определения оптимальной геометрической формы составляет 17–165% в прямом направлении и 19–118% в направлении ответвления при различных соотношениях потоков.

Для снижения потерь энергии в трубопроводах к обычному тройнику применялся комбинированный метод оптимизации геометрических параметров и установки дефлекторов [40], а путем экспериментальных испытаний и моделирования получался тройник с низкими потерями энергии с дефлектором. Коэффициент снижения энергетических потерь (*energy loss reduction rate* - *ELRR*) модифицированного тройника с дефлектором составляет 8,2%-73,5% при различных диаметрах и соотношениях потоков.

В статье [41] предложен метод снижения сопротивления колена с направляющим аппаратом. Определена разумная форма установки направляющего аппарата. Механизм снижения сопротивления анализируется с помощью принципа синергии поля и принципа вязкой диссипации. В исследовании [42] предлагается метод, сочетающий ортогональную схему эксперимента (*OED*) и простую схему сравнения (*SCD*) для оптимизации положения и угла двойных направляющих лопаток в колене. Получено модифицированное колено с двойными направляющими лопатками имеющее сниженное сопротивление. В работе [43] проанализировано влияние различных положений направляющей лопатки на сопротивление Т-образного соединения. Численным методом исследовано распределение полей давления, скорости и линий тока течения и получены характеристики сопротивления Т-образного соединения. Сравниваются общее рассеяние энергии и скорость снижения сопротивления. Показано, что степень снижения сопротивления оптимизированного Т-образного соединения с направляющей лопаткой составляет 21,5%.

В статье [44] использован метод пассивного управления потоком для уменьшения коэффициента потерь энергии при внезапном расширении от квадрата к квадрату. Устройствами для снижения потерь энергии являлись короткие направляющие лопатки, расположенные на краю ступени внезапного расширения. Результаты численного моделирования показали, что коэффициент потерь энергии при внезапном расширении может быть снижен на 20–25%.

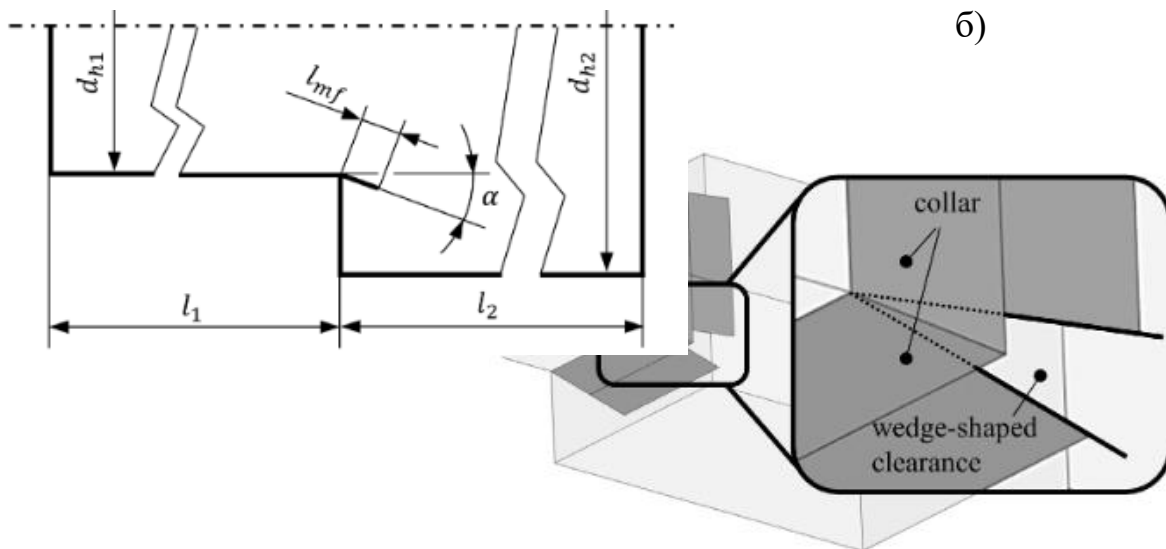


Рисунок 1.2 - Геометрия внезапного расширения, оснащенная направляющими лопатками:
(а) схема и обозначения; (б) трехмерное представление геометрии [44]

В целях оптимизации механизма снижения потерь давления и повышения эффективности использования пневмосистемы, определены принципы и виды пневмопотерь на различных участках [45]. Проанализированы основные геометрические параметры местного вытяжного устройства, влияющие на потерю давления и скорость всасывания. Был проведен эксперимент по ортогональному моделированию и определена наилучшая комбинация параметров. В обзоре [46] рассмотрены конструкции воздуховодов системы вентиляции и кондиционирования воздуха с учетом возможности установки фитингов. Рассмотрены исследования направленные на оптимизацию формы фитингов для уменьшения, создаваемых ими потерь давления.

Тип конструкции имеет влияние на эффективность местного отсоса. В работе [47] авторы выявили гидравлические сопротивления местных отсосов с применением *CFD* моделирования и дискретно-сопряженного метода (*discrete adjoint method – DAM*). Получилось оптимизировать конструкции самих отсосов и уменьшить сопротивление до 57% (рисунок 1.3)

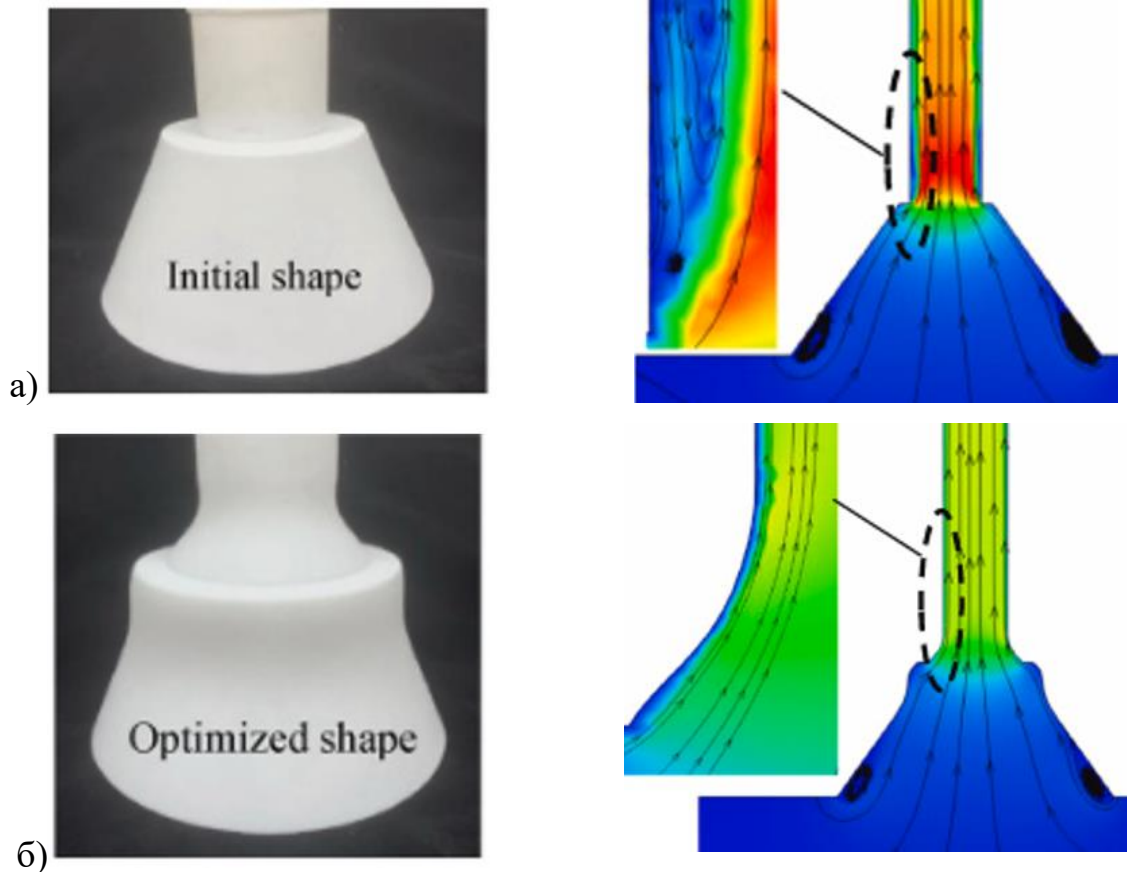


Рисунок 1.3 – Первоначальный (а) и оптимизированный (б) местные отсосы. (слева – фотографии отсоса; справа – картины распределения воздушных потоков) [47]

В статье [48] методом оптимизации удалось повысить производительность циклона, за счет снижения потерь давления на 34%, повысив при этом эффективность его сбора частиц. Оптимальная геометрия определялась сопряженным методом в *Ansys Fluent* с использованием метода *RANS*.

В работе [49] исследовано распределение воздушного потока для модульного вытяжного стола с щелевым отсосом, с применением внутри направляющих лопаток для наилучшего эффекта удаления, где наилучшую равномерность распределения скорости получила четвертая конструкция *structure-4* (рисунок 1.4).

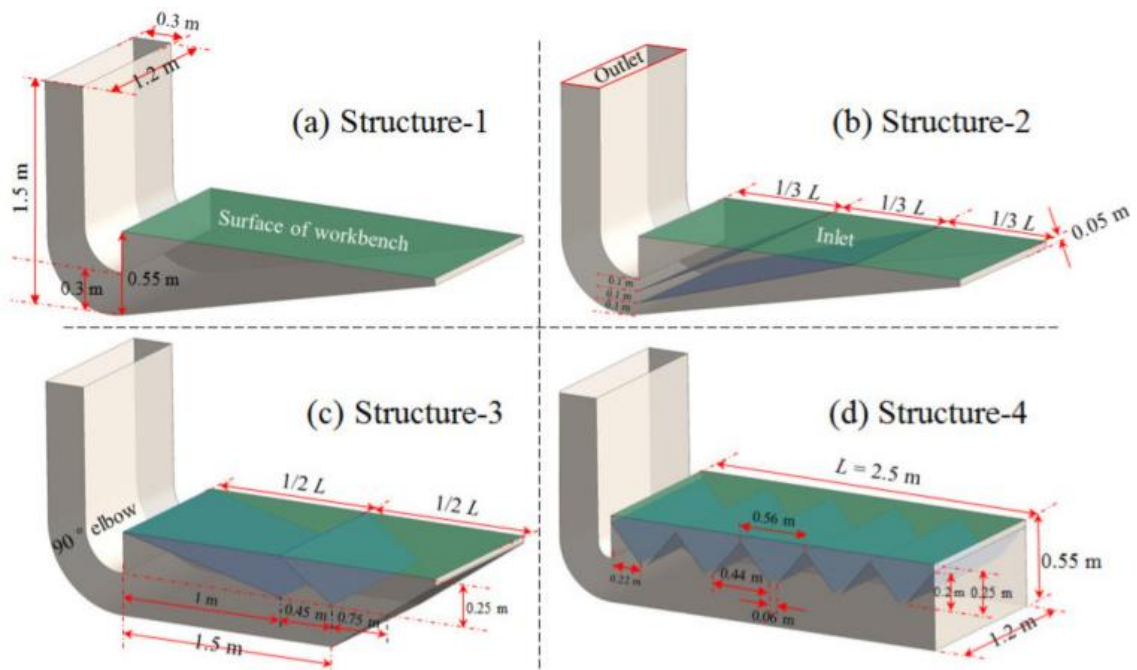


Рисунок 1.4 – Геометрии вытяжного стола с разными вариантами направления лопаток [49]

Представляет интерес работа [50], где экспериментально оценивались поле скоростей круглых и прямоугольных местных отсосов. В работе представлены обширные испытания поля скоростей вблизи отдельно стоящих конфигураций впускного отверстия выхлопных газов. Содержит подробное описание специально сконструированной экспериментальной установки, принятого измерительного оборудования и используемой экспериментальной процедуры (рисунок 1.5). Полученные многочисленные экспериментальные результаты (более 8000) относятся к испытаниям, проведенным как на круглом плоском/фланцевом отверстии (трехмерная осесимметричная задача), так и на плоском/фланцевом пазе (двумерная задача). Экспериментальная установка состоит из: 1. Центробежный вытяжной вентилятор, на рисунок 1.5 F – соединенный трубой из ПВХ, присоединенной гибкой вставкой C , применен для снижения вибрации создаваемым вентилятором. PF – фильтр; 2. D_p – воздухопровод из ПВХ длиной 6 метров с эквивалентным диаметром 170 мм; 3. T – расходомер турбинный, установленный в соответствии направления потока и осью трубы, с точностью 1%. FC – выпрямитель потока, такой

элемент необходим для выпрямления профиля скорости; 4. AP – пневмометрическая трубка Пито; 5. A – анемометр.

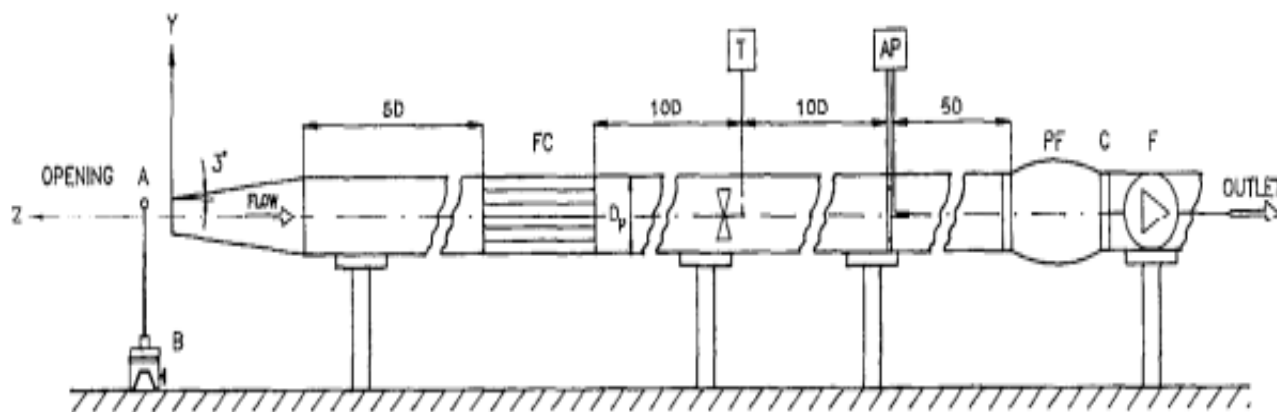


Рисунок 1.5 - Экспериментальная установка из работы [50]

Сравнение результатов экспериментальных данных поля скоростей показало, что при разных диаметрах раструба, не дает существенного расширения контуров скорости по сравнению с меньшими размерами, и не дает каких-либо преимуществ для эффективной вытяжки, поскольку больший внешний диаметр не сопровождается пропорциональным расширением контура скорости.

В работах [30, 31] эти заключения подтверждаются, при разных длинах раструба разница скоростей незначительная, но длина раструба влияет на эффективность всасывания вредных выделений из-за отрывных потоков на входе в отсос. При подтекании воздуха к отсосу-раструбу происходит срыв потока, с острой кромки, далее при входе потока в канал по месту присоединения фланца раструба при некоторых углах и размерах полки также может возникнуть вторая вихревая зона. При недостаточной длине полки первая зона не замыкается на ней, а распространяется внутрь канала. Также, заметны значительные различия коэффициента местного сопротивления (КМС), относительно длины раструба.

В некоторых исследованиях рассматриваются возможности уменьшения сопротивления фасонных элементов вентиляционных систем путем применения природных аналогов или примеров. В одной из работ [51] стенка тройника, которая находится напротив отверстия для подключения бокового ответвления, имеет форму, аналогичную очертаниям русла реки. В работе также предлагается использовать аналогию с развилкой дерева [52] для разделения тройника. Данные виды конструкций позволяют снизить сопротивление в прямых воздуховодах с любым соотношением потоков и удлинением, при этом степень снижения сопротивления составляет от 20,45% до 248,21%. Эффект снижения сопротивления нового тройника подтверждены натурными экспериментами.

1.2 Местные отсосы открытого типа, требования к ним

В соответствии с законодательством РФ, условия труда, рабочее место и трудовой процесс не должны оказывать вредное воздействие на человека [53]. На производстве человек может столкнуться с риском воздействия различных негативных факторов: высокие температуры, электрический ток, перерабатываемые материалы и их частицы, шумы, повышенная влажность, загазованность и запыленность, также химические и биологические опасности. Все эти факторы оказывают комплексное воздействие на организм человека в зависимости от конкретных условий труда.

Основные требования комфортных и безопасных для человека условий труда устанавливаются следующими требованиями [53-61]. Оценку количества вредных выделений в воздухе – их концентрацию определяют с помощью показателя ПДК (предельно-допустимая концентрация) вредных веществ. Требуемый уровень ПДК зависит от класса опасности вредного вещества. Значительное количество технологических процессов связаны с механической переработкой сыпучих веществ и выделением пыли в воздух рабочей зоны. Производственная пыль является наиболее распространенным

вредным фактором на предприятиях горноперерабатывающей, строительной отрасли, в зернопереработке, промышленности строительных материалов. В горнорудной и угольной промышленности значительное количество пыли возникает во время дробления, грохочения и перегрузки материалов. Большой класс производственных вредностей – дымы и возгоны, например, сварочный аэрозоль. Пыль возникает во время бурения и при взрывных работах, в угольной промышленности – при работе комбайнов и породопогрузочных машин, при сортировке угля и т.д. Вся промышленность строительных материалов связана с процессами дробления, помола, смешения и транспортировки пылевидного сырья и продукта (цемент, кирпич, шамот и др.). В нефтяной и газовой промышленности пыль образуется при бурении скважин, проведении электросварочных работ, при неполном сгорании топлива. В химической и нефтехимической промышленности многие производства (например, катализаторное) также связаны с пылеобразованием. В сельском хозяйстве пыль образуется при рыхлении и удобрении почвы, использовании порошкообразных пестицидов, очистке зерна и семян, хлопка, льна и др. [62]. Некоторые виды производственной пыли способны к самовозгоранию и даже взрыву, что позволяет относить пыль не только к вредным, но и опасным производственным факторам.

Как отмечается в многочисленных работах [63-70], факторы, влияющие на энергоемкость систем обеспыливания, являются: объемы удаляемого воздуха, концентрации вредных выделений, конструктивные решения элементов систем и их аэродинамические сопротивления.

На данный момент существует множество разновидностей местных вытяжных устройств, называющихся также, «вытяжной рукав», с различными исполнениями.

На рынке представлены такие фирмы как Совплим (*Plymovent*), *Nederman*, *Kemper*, *KlimaWent*, *Menegon*, *Fumex* и т.д. [71-76] (Рисунок 1.6). На рисунке 1.7 заметен выступ у отсоса-раструба.

а)



б)



в)



г)



д)



е)



Рисунок 1.6 - Местные вытяжные устройства (рукав)

где: а – Совплим; б – Nederman; в - Kemper; г - KlimaWent; д - Menegon; е - Fumex



Рисунок 1.7 – Местный отсос-раструб с выступом

Конструкция местного отсоса и его необходимая производительность существенным образом зависят от геометрии и типа источника вредности.

Профессор, д.т.н. Посохин В.Н. [77] утверждает, что при выборе схемы местного отсоса и его конструктивной проработке необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- отсос должен быть максимально приближен к источнику и по возможности огражден от помещения; наилучшим решением является отсос от полного укрытия источника;
- всасывающее отверстие должно быть расположено так, чтобы поток вредных выделений как можно меньше отклонялся от первоначального

направления движения и при этом удаляемый поток не проходил через зону дыхания работающего;

- размеры приемного отверстия отсоса следует принимать равными или несколько большими, чем размеры подтекающей к отсосу струи. Уменьшение размеров отсоса ведет к возрастанию скорости воздуха, необходимой для улавливания вредных выделений;

- форма приемного отверстия местного отсоса должна соответствовать форме источника;

- распределение скорости всасывания в приемном отверстии местного отсоса рекомендуется устраивать неравномерным, соответствующим распределению скорости в подтекающей струе. Для этой цели следует использовать вставки, обеспечивающие желаемую неравномерность всасывания. Если источник перемещается в некоторой ограниченной зоне (пайка, сварка и т. п.), то распределение скорости всасывания в отверстии должно быть равномерным, что достигается с помощью выравнивающих решеток;

- препятствиям на пути движения воздуха к отсосу следует придавать форму, при которой сопротивление будет минимальным; острые кромки, например, рекомендуется профилировать;

- местный отсос не должен мешать технологическому процессу.

Существуют несколько подходов к определению эффективности открытых отсосов-раструбов. Как правило, сравнивают осевую скорость во всасывающем сечении раструба, однако данное сравнение не совсем корректно для сравнения отсосов с развитым раструбом (рисунок 1.6, а, е) и отсосов с перпендикулярной полкой, (рисунок 1.6, б, в). Применяется метод сравнения по осевой скорости на расстоянии диаметра или двух от всасывающего сечения. Известен, коэффициент (критерий) неравномерности всасывания – определяется путём деления скорости воздушного течения в

центре сечения, проходящего через кромки раструба к величине средней скорости всасываемого потока [31].

На основании выводов различных методов локализации пылевыведений при помощи систем местной вытяжной вентиляции [68, 77, 78], выявлено, что необходим комплексный подход для совершенствования методов их расчета и конструирования.

В трудах Идельчика И.Е. [79-80] обсуждается, что КМС при входе в прямую трубу различается у разных авторов, варьируются от 0,5 до 1. Автор [81] пришел к выводу, что различия связаны с толщиной на входе кромки (стенки) трубы. При увеличении толщины кромки наблюдается снижение коэффициента сопротивления. Исходя из этих соображений, И.Е. Идельчик предлагает приспособить на входе в трубу кольцевой раструб «вихревой коллектор» (рисунок 1.8), для улавливания отрывных потоков при входе в прямую трубу и таким образом снизить КМС.

В литературе [77, 82] описывается, что зонт следует делать с углом раскрытия $\beta \approx 60^\circ$ либо 120° . Рациональная конструкция отсоса показана на рисунке 1.9. Внутри корпуса зонты закреплена коническая вставка, а по периметру корпуса устроен круговой уступ. Вставка обеспечивает желаемую неравномерность скорости всасывания в приемном сечении зонты, соответствующую неравномерности профиля скорости в подтекающей струе. Наличие кругового уступа позволяет при любом угле раскрытия достичь эффективного всасывания практически по всей площади зонты, вихревая зона при этом размещается в уступе.

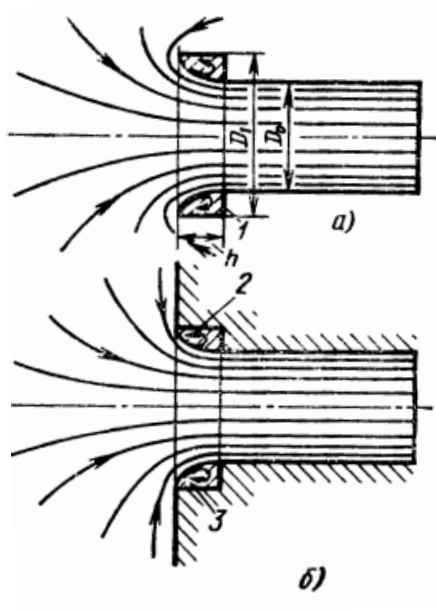


Рисунок 1.8 – Вход через кольцевой раструб («вихревой коллектор»):

а – вход из неограниченного пространства; б – вход из полупространства (1 – ребро; 2 – уступ; 3 – вихревой коллектор) [79].

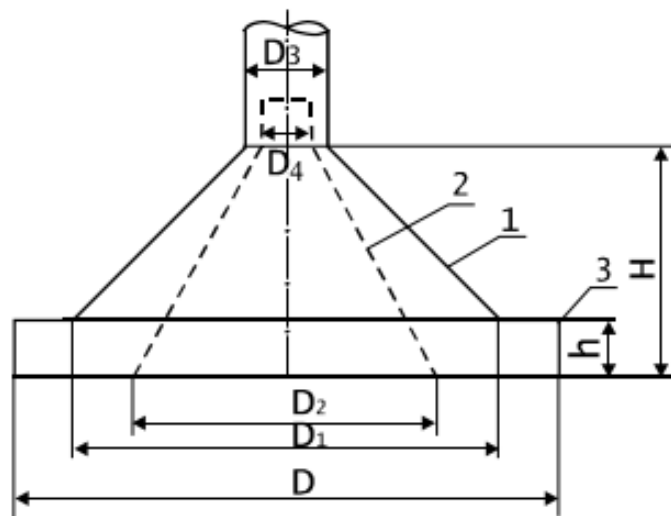


Рисунок 1.9 - Рациональная конструкция вытяжного зонта: 1 – корпус зонта; 2 – вставка; 3 – уступ по периметру зонта [77].

В работах [30, 31, 83] описано, что наиболее оптимальным является отсос-раструб с углом раскрытия $\beta \approx 180^\circ$, у которого захват пылевых частиц эффективнее, осевая скорость вблизи отсоса наибольшая, начиная с 0,7 калибра от входа в отсос.

1.3 Вихревые зоны и аэродинамические сопротивления. Методы расчета отрывных течений на входе во всасывающие каналы

Местные потери давления – это аэродинамическое сопротивление, сосредоточенное в одном месте на коротком участке воздуховода. В местных сопротивлениях всегда происходит перестройка поля скоростей и образование на границах потоков вихрей [84] и, как следствие, потерь давления. Как правило, потери давления возникают в поворотах потока, сужениях, в тройниках, где происходит смешение или разделение потока, также возникают в элементах, где имеются острые кромки, приводящие к появлению вихревых зон [85]. Отдельно выделяют потери давления в случаях, где происходит обтекание какого-нибудь тела [88-89]. В случае местного отсоса (отсоса-раструба), происходит сужение потока из-за вихревых зон, образующихся на острых кромках или при переходе из раструба в воздуховод. В вихревых зонах создаются замкнутые течения и потери энергии. Как описывается в [83], данные вихри исключить довольно сложно, но возможно лишь их немного снизить, используя направляющие лопатки, профилирование.

Для определения потерь давления в местных сопротивлениях используется формула 1.1 [84]:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2}. \quad (1.1)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления (КМС); ρ – плотность воздуха кг/м³; v – скорость воздуха, м/с.

Аналитический метод расчета определения величин КМС занимались авторы [28, 83, 90-91] и др. Экспериментальным путем доказали адекватность принятых расчетных моделей.

В исследованиях [83] значение коэффициента местного сопротивления (КМС) определялись по формуле:

$$\zeta = \frac{(P_b - P_e - \Delta P_{fr})}{P_d}. \quad (1.2)$$

Здесь P_b – начальное избыточное давление, принимаемое равным нулю; P_e – конечное давление в канале (на границе линии **KL**, Рисунок 1.9), Па; $\Delta P_{fr} = R_{fr} \cdot l$ – потери давления на трение в канале, Па; $P_d = \rho \cdot v_0^2 / 2$ – динамическое давление в канале, Па; R_{fr} – удельные потери давления в канале, определяемые по результатам обработки, найденного численно, поля полного давления в канале, Па/м; l – длина канала (см. рисунок 1.10).

Кроме того, именно с явлением отрыва потока связаны потери энергии и шумообразование на входе в отсос [92, 93], чем больше размеры вихревой зоны (ВЗ), тем, как правило, больше потери энергии.

Ранее, отрывы потока определялись с помощью метода наложения потоков (МНП), в работе [94-98] приводятся расчеты в линейном, кольцевом, круглом и прямоугольном отверстиях. Метод состоит в том, что скорость потока, определяется путем сложения векторов скоростей. Таким образом, можно смоделировать подтекание воздуха к стокам, ограниченным непроницаемыми поверхностями. Продолжение метода наложения потоков является метод граничных интегральных уравнений (ГИУ), который может охватить широкий спектр задач аэродинамики [99-101].

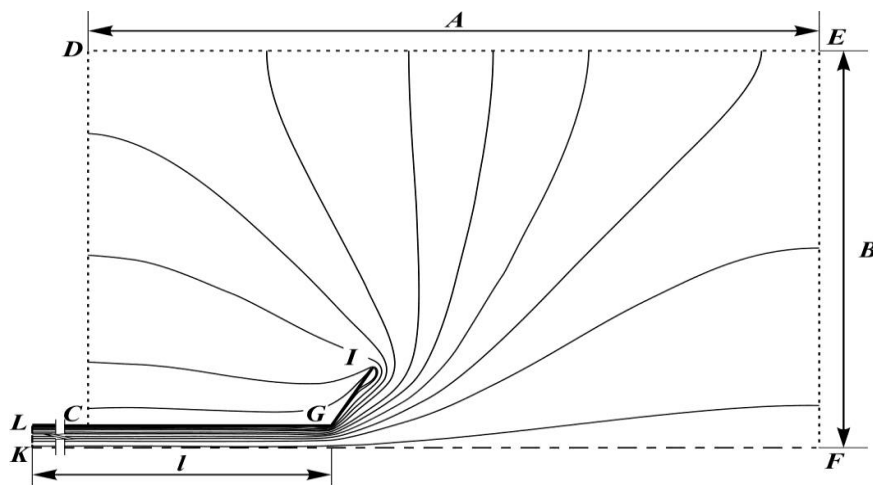


Рисунок 1.10 - Пример геометрия расчетной области и линии тока течения к раструбу длиной $2R$ под углом 60° [83]

Так же, стоит уделить внимание методу комфортных отображений (МКО). Данный метод применялся для расчетов щелевых отсосов-раструбов [84, 102-108], в этом случае задачи сводятся к плоскости. Важным свойством МКО является принцип симметрии. Данные методы были использованы в трудах ученых В.Н. Посохина, В.Н. Талиева, И.Н. Логачева, К.И. Логачева, О.А. Аверкова, Г.М. Позина и др.

С развитием компьютерных программ и ЭВМ, продолжением метода наложения потоков, можно назвать, метод дискретных вихрей (МДВ), широко применяемый в аэродинамике для расчетов несущих поверхностей, турбулентных струй и следов. Данный метод позволяет не только определить вихревые зоны, но и позволяет исследовать влияние приточных струй на всасывающие факелы [93, 107-108].

Размеры вихревых зон определялись в работах [83, 90, 91] с помощью МДВ, где задачи решаются в рамках модели идеальной жидкости. Суть метода состоит в том, что твердые поверхности моделируются системой присоединенных вихрей (линейные, кольцевые) [106, 109-137], которые, двигаясь вдоль этих поверхностей, срываются с острых кромок и перемещаются далее, как свободные вихри, образуя вихревую зону. «Насыщаясь», вихревая зона увеличивает свои размеры и за небольшой промежуток времени, форма её и течение стабилизируются [110].

Интенсивности вихрей определяются из граничных условий задачи: твердые поверхности непроницаемы, скорость в патрубке на большом удалении от входа в отсос равномерна. После нахождения интенсивности ВЗ методом наложения потоков, определяются геометрические размеры ВЗ.

Картины течения для щелевидного отсоса-раструба и вблизи щелевидного отсоса [102], полученные численным путём, сравнивались с экспериментами [65] с луковичной шелухой (рисунок 1.11).

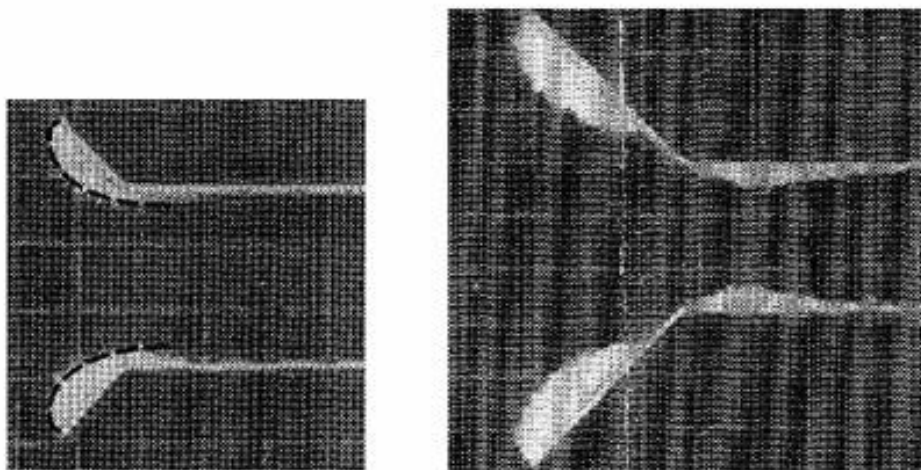


Рисунок 1.11 - Фотографии вихревых областей в экспериментах с луковичной шелухой [102]

Численные методы, используемые в задачах аэродинамики, можно условно разделить на два класса – сеточные методы и бессеточные методы. Сеточные методы имеют лучшее математическое обоснование, высокую точность и ряд других преимуществ. Однако их применение требует больших вычислительных затрат, а также предполагает достаточно трудоемкую процедуру создания сетки во всей расчетной области, размеры которой подчас выбираются достаточно большими для уменьшения влияний граничных условий. Тем не менее сеточные методы считаются наиболее точными и хорошо себя зарекомендовавшими для задач аэродинамики. Бессеточные методы имеют менее строгое математическое обоснование (зачастую их относят к методам моделирования), но требуют на порядок меньших вычислительных затрат, не накладывают ограничений на размер расчетной области, позволяют автоматически удовлетворять условиям «на бесконечности» [111].

Метод дискретных вихрей (МДВ) относится к бессеточным методам. Результаты расчета вихревой структуры течения при помощи МДВ в нестационарной постановке для двумерного отсоса-раструба показаны на рисунке 1.12. Для двумерных течений при реализации МДВ используются

бесконечно длинные вихревые жгуты (прямые) и бесконечно тонкие кольцевые вихри без самоиндукции.

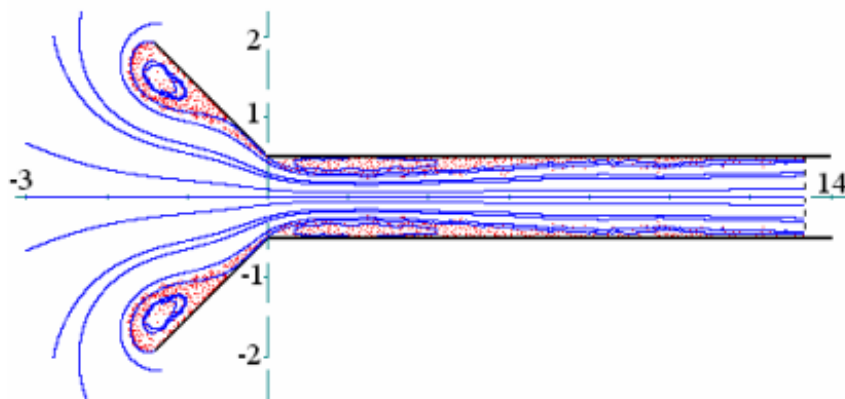


Рисунок 1.12 - Линии тока и вихревая структура течения на входе в щелевой отсос-раструб с углом раскрытия 45° и длиной в 4 калибра [102]

В работах [113-115] рассматривались пространственные течения в круглых, многоугольных и квадратных местных отсосах открытого типа в упрощенной пространственной постановке. Контрольные (расчетные) точки были симметричны относительно оси отсоса. Под руководством проф. К.И. Логачева, на основе метода МДВ в квазиосесимметричной нестационарной постановке, была разработана программа, позволяющая определять границы отрывных зоны (Рисунки 1.13-1.14).

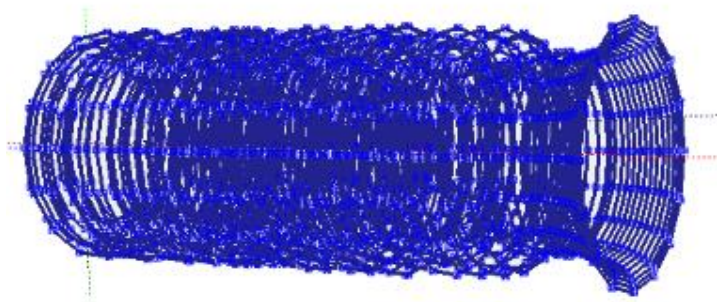


Рисунок 1.13 - Свободная вихревая пелена внутри трубы [113].

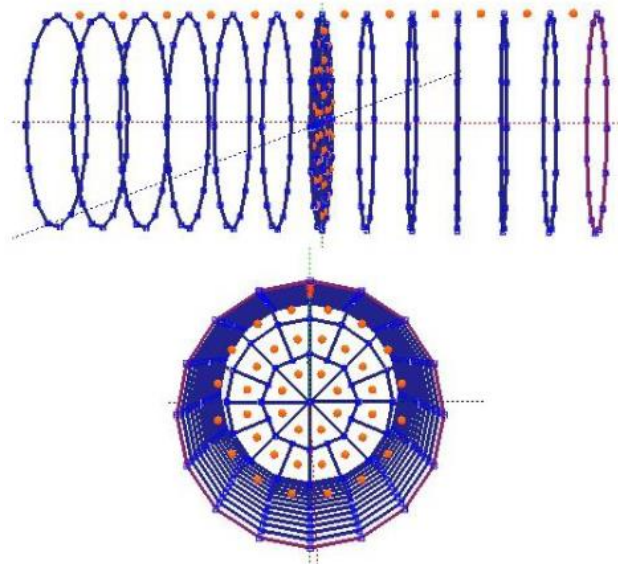


Рисунок 1.14 - Дискретизация многоугольного всасывающего канала [113].

В качестве дискретных элементов использовались вихревые многоугольники. С помощью этой программы был исследован отрыв потока на входе в квадратный всасывающий канал (Рисунок 1.15).

В квадратном патрубке наблюдаются пульсации скорости, а значит и свободной поверхности тока. Расчёт производится значительно дольше, чем для осесимметричной постановки задачи.

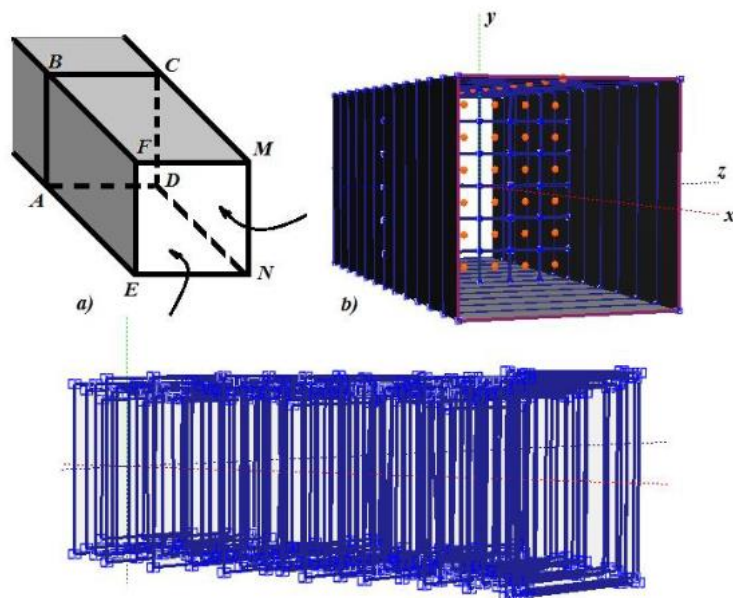


Рисунок 1.15 - Квадратный патрубок: а) схема; б) модель; в) свободная вихревая пелена [115]

Прямоугольные отсосы в такой постановке рассматривать не представляется возможным, необходимо переходить к полной пространственной постановке задачи. Для определения границ вихревой зоны необходимо использовать стационарную постановку задачи, поскольку в нестационарной постановке граница вихревой зоны постоянно пульсирует и необходимо длительное время на нахождения осреднённой по времени границы.

Решение такой задачи в полной пространственной постановке было произведено в серии статей [116-117, 137], при непосредственном участии соискателя данной диссертации. При помощи метода дискретных вихрей было исследовано отрывное течение на входе в прямоугольный всасывающий канал с острыми кромками при разном отношении длины и ширины канала.

Основой для построения вихревой системы является вихревой прямолинейный отрезок. Из них формируются другие вихревые элементы – квадратные вихревые рамки, прямые и криволинейные подковообразные вихри, замкнутые многоугольные вихревые рамки. Квадратные вихревые рамки и прямые подковообразные вихри используются для дискретизации границ отсоса. Криволинейные подковообразные вихри и замкнутые многоугольные вихревые рамки используются для построения отрывной поверхности тока.

Граница раструба дискретизируется N вихревыми рамками: прямоугольными и прямыми подковообразными. Количество прямоугольных рамок, примыкающих к острой кромке, N_l . Это первый слой квадратных рамок (рисунок 1.16-1.17). При определении влияния вихревой рамки на заданную точку определяются влияния вихревых отрезков по указанному на рисунке направлению. Количество слоев, дискретизирующих боковую поверхность K_l . Последний слой заменяется прямыми подковообразными вихрями. Вихревые элементы на боковой поверхности имеют номера 1, 2, ..., N_l-1 . Номер вихревой рамки, охватывающей активное сечение N_l . Всасывающее сечение дискретизируется прямоугольными вихревыми рамками с номерами N_l+1 ,

$N_1+2, \dots, N$. В центре прямоугольных рамок расположены контрольные (расчетные) точки, координаты которых вычисляются из координат вершин a , b , c , d , как среднее арифметическое соответствующих координат вершин. Расчетные точки для подковообразных вихрей расположены там же, что и для прямоугольных (на рисунке 1.16 изображены крестиками).

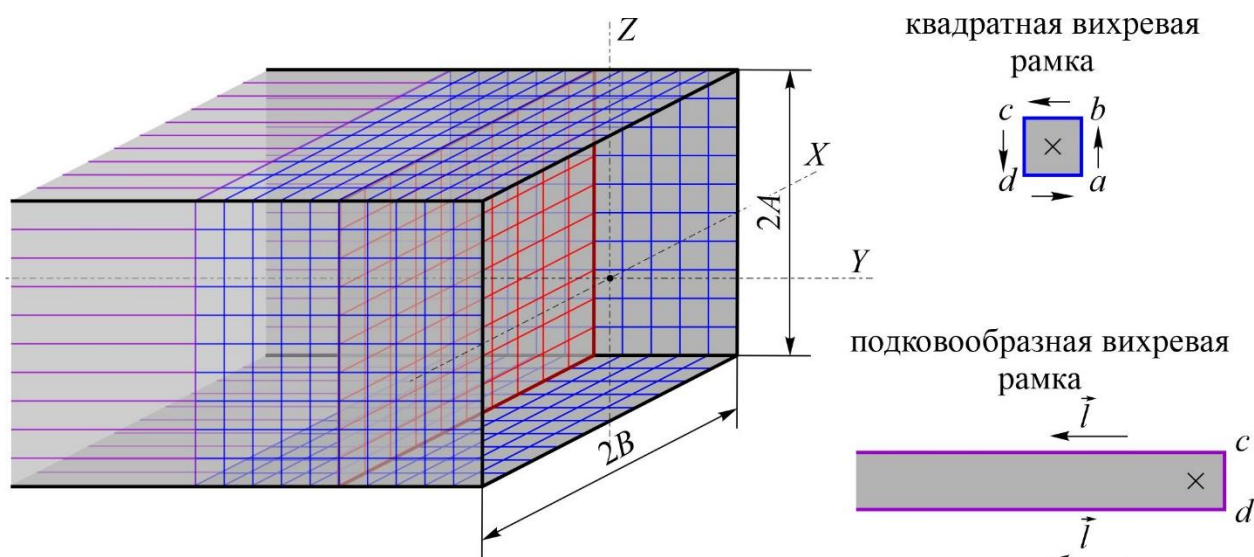


Рисунок 1.16 – Дискретная математическая модель, дискретизация отсоса вихревыми рамками, виды вихревых рамок.



Рисунок 1.17 – Дискретная математическая модель, нумерация присоединенных вихревых элементов — квадратных вихревых рамок и прямых подковообразных вихрей

Вычислительный алгоритм состоял из следующих шагов.

1. Формируется матрица G^{pq} , $p=1,2, \dots, N_1-1$; $q=1,2, \dots, N_1$, воздействия на расчетные точки присоединенных вихрей – квадратных вихревых рамок и прямых подковообразных вихрей единичных интенсивностей.

2. Формируется матрица G^{N_1q} , $q=1,2,\dots, N_1$, воздействия на расчетные точки t , лежащих во всасывающем (активном) сечении, вдоль направления внешней нормали $\mathbf{n}$ присоединенных вихрей единичных интенсивностей:

$$G^{N_1q} = \sum_{p=N_1+1}^N v(t, \mathbf{n}, q) dS_p. \quad (1.3)$$

где $dS_p = h \cdot h$ – площади рамок во всасывающем сечении; $v(t, \mathbf{n}, q)$ – это функции $v_3(t, \mathbf{n}, l, q)$ либо $v_4(t, \mathbf{n}, q)$ в зависимости от номера q , под которыми пронумерованы квадратные либо прямые подковообразные вихри. Физический смысл величины $v(t, \mathbf{n}, q) \cdot dS_p$ – это расход воздуха, проходящий через p -ю рамку активного сечения, который индуцируется q -м присоединенным вихрем.

Сформированная матрица G^{pq} , $p=1,2, \dots, N_1$; $q=1,2, \dots, N_1$, в процессе итерационного определения вихревой свободной поверхности не изменяется.

3. Задаются начальные нулевые значения для количества узлов свободных вихревых ломанных $\gamma_q^{new} = 0$, $\gamma_q^{old} = 0$, начальные нулевые значения циркуляций свободных криволинейных рамок $\gamma_r^{new} = 0$, $\gamma_r^{old} = 0$ их начальное нулевое количество. Далее идет итерационная процедура построения свободной вихревой поверхности тока, сходящей с острой кромки патрубка.

3.1. Начало внешнего итерационного цикла.

3.2. Начало внутреннего итерационного цикла, который выполняется пока абсолютное значение разности новой и старой циркуляции свободной вихревой рамки больше заданной точности: $|\gamma_r^{new} - \gamma_r^{old}| > \varepsilon$. В расчетах $\varepsilon = 10^{-5}$.

3.3. Формирование свободных членов системы линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных интенсивностей

вихревых элементов из граничных условий для нормальной составляющей скорости:

$$v_p = v_p - \sum_{q=1}^{K_l} v_{3\approx}(t_p, \mathbf{n}, q) \cdot \gamma_q^{new} - v_r(t_p, \mathbf{n}, N_{f_min}) \gamma_r^{new}, \quad p=1, 2, \dots, N_1-1, \quad (1.4)$$

$$v_{N_1} = v_0 \cdot 4A \cdot B - \sum_{q=1}^{K_l} \gamma_q^{new} \sum_{p=N_1+1}^N v_{3\approx}(t_p, \mathbf{n}, q) dS_p - \gamma_r^{new} \sum_{p=N_1+1}^N v_r(t_p, \mathbf{n}, N_{f_min}) dS_p, \quad (1.5)$$

где t_p – расчетная точка – середина p -й рамки боковой поверхности прямоугольного канала, $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль в этой расчетной точке.

3.4. Решается система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных циркуляций вихревых рамок

$$\sum_{q=1}^{N_1} G^{pq} \Gamma^q = v^p, \quad p=1, 2, \dots, N_1. \quad (1.6)$$

Получение новых значений циркуляций свободных вихревых ломанных и рамок:

$$\gamma_q^{old} = \gamma_q^{new}, \quad q=1, \dots, K_l; \quad \gamma_q^{new} = \Gamma^q, \quad q=1, \dots, K_l. \quad (1.7)$$

Если внешний итерационный цикл повторяется не в первый раз, то:

$$\gamma_r^{old} = \gamma_r^{new}, \quad \gamma_r^{new} = \Gamma^{N_1} / N_{f_min}. \quad (1.8)$$

3.5. Конец внутреннего итерационного цикла. При прохождении внешнего итерационного цикла в первый раз внутренний итерационный цикл повторяется только один раз.

3.6. Построение свободных вихревых ломанных по линиям тока, сходящих с острых кромок патрубка с шагом h . Наименьшее количество узлов ломанных $N_{f_min}^{new}$. Запоминаются значения узлов вихревых ломанных.

Количество узлов на свободных вихревых ломанных получает новое значение:

$$N_{f_min} = N_{f_min}^{new}. \quad (1.9)$$

3.7. Конец внешнего итерационного цикла. При выполнении внутреннего итерационного цикла один раз – процесс определения свободной вихревой системы считается построенной.

Таким образом, в процессе итерационной процедуры решается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{q=1}^{N_l(K_l-1)} v_4(t_p, \mathbf{n}, q) \Gamma^q + \sum_{q=N_l(K_l-1)+1}^{N_l K_l} v_3(t_p, \mathbf{n}, l, q) \Gamma^q + v_4(t_p, \mathbf{n}, N_1) \Gamma^{N_1} = \\
 & = - \sum_{q=1}^{K_l} v_{3\approx}(t_p, \mathbf{n}, q) \gamma_q^{new} - v_r(t_p, \mathbf{n}, N_{f_min}) \gamma_r^{new}, \quad p=1, 2, \dots, N_1-1, \\
 & \sum_{q=1}^{N_l(K_l-1)} \left(\sum_{p=N_1+1}^N v_4(t_p, \mathbf{n}, q) dS_p \right) \Gamma^q + \sum_{q=N_l(K_l-1)+1}^{N_l K_l} \left(\sum_{p=N_1+1}^N v_3(t_p, \mathbf{n}, l, q) dS_p \right) \Gamma^q + \\
 & + \Gamma^{N_1} \sum_{p=N_1+1}^N v_4(t_p, \mathbf{n}, q) dS_p = 4A \cdot B \cdot v_0 - \sum_{q=1}^{K_l} \gamma_q^{new} \left(\sum_{p=N_1+1}^N v_{3\approx}(t_p, \mathbf{n}, l, q) dS_p \right) - \\
 & - \gamma_r^{new} \sum_{p=N_1+1}^N v_r(t_p, \mathbf{n}, N_{f_min}).
 \end{aligned}$$

После завершения итерационной процедуры можно определять поле скоростей и строить линии тока с использованием формулы 3:

$$\begin{aligned}
 v_n(x) = & \sum_{q=1}^{N_l(K_l-1)} v_4(x, \mathbf{n}, k) \Gamma^q + \sum_{q=N_l(K_l-1)+1}^{N_l K_l} v_3(x, \mathbf{n}, l, k) \Gamma^q + \sum_{q=1}^{K_l} v_{3\approx}(x, \mathbf{n}, i) \gamma_q^{new} + \\
 & + v_r(x, \mathbf{n}, N_{f_min}) \gamma_r^{new}.
 \end{aligned} \quad (1.10)$$

На основе описанного вычислительного алгоритма была разработана компьютерная программа для определения скорости воздушного потока и границ отрывной поверхности тока при входе в прямоугольный отсос. Пример построения свободной поверхности тока представлен на рисунке 1.18. Вдоль патрубка, начиная с острой кромки и заканчивая всасывающим сечением, размещены свободные криволинейные подковообразные вихри. Сравнение полученных результатов с известными и проведенными экспериментально и в CFD демонстрирует адекватность разработанного метода.

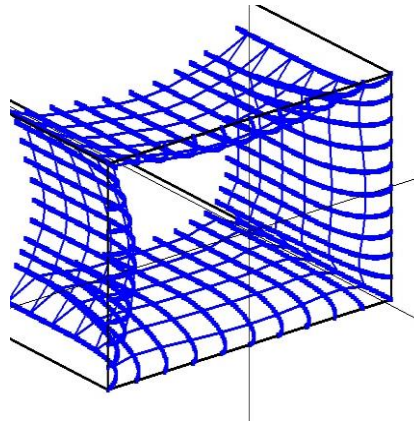


Рисунок 1.18 - Свободная вихревая система на входе в квадратный всасывающий

Для расчета воздушных течений можно использовать метод магнитной или вихревой аэрогидродинамической аналогии [118], где также, имеется возможность определить поля скоростей в упрощенной трехмерной постановке задачи [119]. Были определены поля скоростей вблизи патрубков разной формы в неограниченном пространстве.

Представляет еще интерес [120], открытый код в *MATLAB*, для двумерного численного решения уравнений Навье-Стокса [121], с несжимаемым потоком, который состоит из двух уравнений: уравнения движения, уравнения неразрывности.

Хотя этот код рассчитывает только в двумерном пространстве, последовательность вычислений и шаблоны доступа к памяти типичны для научных и инженерных приложений. Преимущества заключаются в том, что граничные условия определяются графически, с помощью изображения в формате *png* (рисунок 1.19) [120].



Рисунок 1.19 - Сценарий движения жидкости, (красная линия — место начала движения жидкости, задается как граничное условие — скорость; зеленая — конец расчетной области, аналогия в *CFD* — атмосферный воздух, черная - граница) [120]

Решаются в основном уравнением Рейнольдса (*RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes)*) - уравнения движения вязкой жидкости, осреднённые по Рейнольдсу [122]. Поскольку, свойство вязкости присуще реальным жидкостям независимо от режима их движения в уравнении Рейнольдса усредняются величины скорости и давления по времени для пульсирующих составляющих [123].

Имеются также комбинированные подходы, сочетающие в себе те или иные черты указанных подходов, например, метод моделирования отсоединенных вихрей (*Detached Eddy Simulation, DES*), и ряд других, не имеющих должного физического обоснования и потому не получивших широкого распространения [124].

Прямое численное моделирование (*Direct Numerical Simulation, DNS*) заключается в решении полных трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса. При таком подходе разрешаются все масштабы турбулентного движения, что позволяет рассчитать амплитудно-частотные и средние характеристики потока при помощи осреднения по достаточно длинному (статистически представительному) интервалу времени [123]. Ограниченность *DNS* послужила толчком для развития нового направления вычислительной гидродинамики, получившего название метода моделирования крупных вихрей (*Large Eddy Simulation, LES*) [124-125].

Уравнение Навье-Стокса применяется в большинство ПО вычислительной гидродинамики (ВГД, в переводе *CFD - computational fluid dynamics*), особенно методом *RANS*. В работах [126-128], сделан подробный анализ разных моделей турбулентности *RANS*, «стандартная» *k-ε* модель (*SKE*) и модель «Рейнольдсовых напряжений» (*RSM – Reynolds Stress Model*) в сочетаниях с двумя способами пристеночного моделирования – «стандартные» пристеночные функции (*SWF – Standard Wall Functions*) и расширенное пристеночное моделирование (*EWI – Enhanced Wall Treatments*). Данный метод был применен для расчета отсосов-раструбов без дополнительных полок.

Для отсоса-раструба углом наклона 60 градусов (рисунок 1.20) показано сравнение отрывных зон, полученных по результатам численного расчета для сочетания разных моделей (а), и для сочетания *RSM EWT* для задач с разной степенью измельчения расчетной сетки (b) (линии подписаны значениями величины y^+). Видно, что очертание вихревой зоны, полученное при использовании сочетания моделей *RSM EWT*, хорошо совпадает с экспериментом и методом дискретных вихрей (*DVM*). По рисунку 1.20b видно, что при измельчении расчетной сетки, очертания вихревой зоны несколько меняются, но для двух последних задач (с $y^+=4,4$ и $y^+=2,1$) отличие уже не существенно.

На рисунке 1.21 представлена валидация результатов расчета при уменьшении размеров расчетной ячейки, в виде графика изменения КМС (ζ), в зависимости от величины безразмерного параметра y^* (для *SWF*) и y^+ (для *EWT*), характеризующего степень измельчения расчетной сетки в пристеночной области, где хороший результат показал при настройках *RSM*.

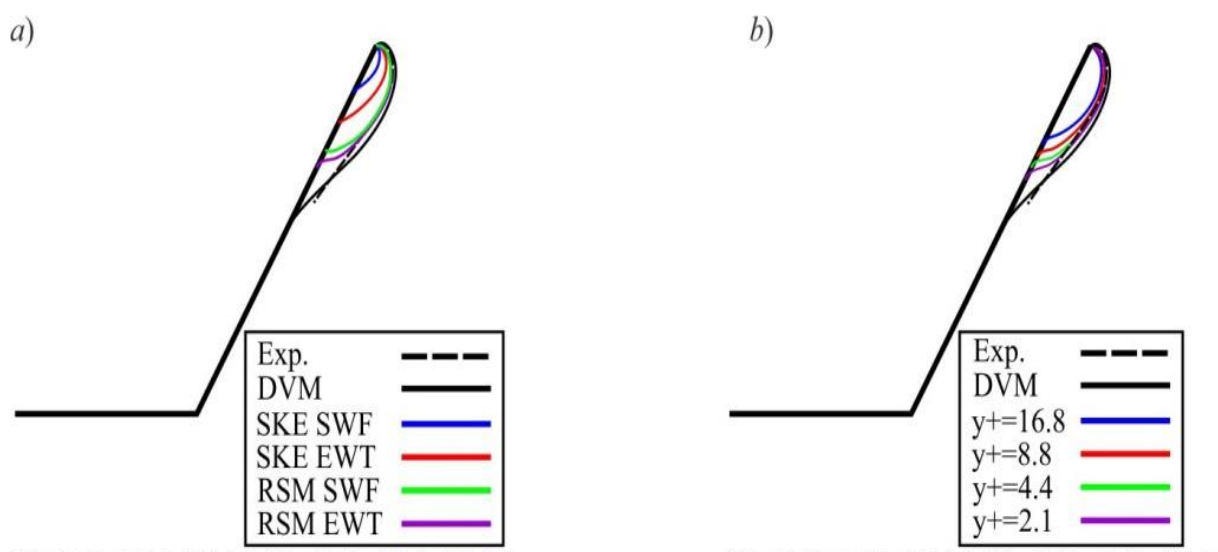


Рисунок 1.20 - Очертания вихревой зоны: а) для разного сочетания моделей; б) для сочетания *RSM EWT* при уменьшении размеров ячеек расчетной сетки

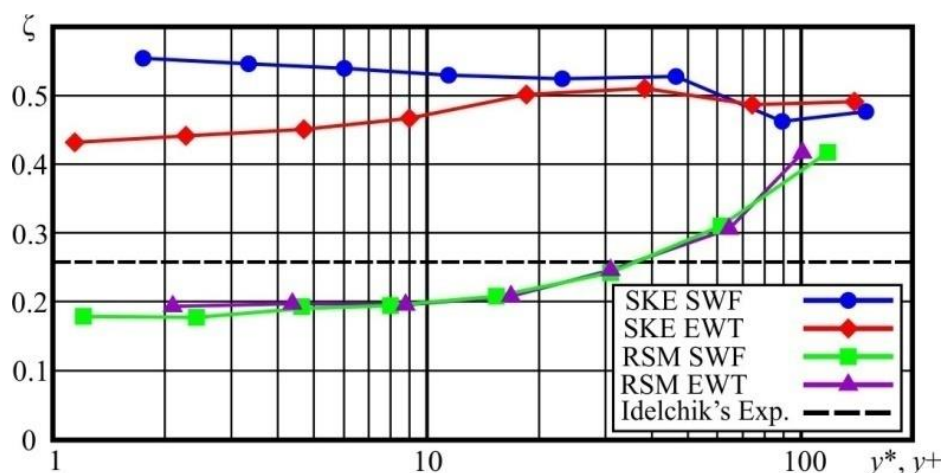


Рисунок 1.21 - Изменение ζ при уменьшении размеров ячеек расчетной сетки, для разного сочетания турбулентных моделей

У каждого ПО свой численный метод расчета (методы дискретизации), основанных на разных уравнениях (в основном Навье-Стокса, Эйлера). Самые основные методы это: метод конечных объемов (*FVM*), метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей и т.п.

В *FloEFD* имеется интеграция с *Solidworks* и называется *Flow Simulation*, это позволяет смоделировать геометрию и выполнить все расчеты и анализы в «одном окне» [129], все задачи решаются с помощью дифференциальных уравнений движения, неразрывности энергии, теплопроводности стенок канала. Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая модель турбулентности $k-\varepsilon$.

Движение вязкой сжимаемой жидкости в *FloEFD* описывается уравнением Навье-Стокса, представляющее математическое выражение законов сохранения массы, энергии и импульса. В *FloEFD* используется одна система уравнений для описания как ламинарных, так и турбулентных течений. Более того, осуществляется автоматический переход из ламинарного состояния в турбулентное, и наоборот [130].

Пристеночная обработка применяется двухмасштабной пристеночной функцией (2SWF), подход с использованием пристеночной функции и гипотезы Ван-Дрифта [131] о длине смещения – для соединения расчета пограничного слоя с основными свойствами потока [132].

Поэтому настройка численной схемы для *FloEFD* не требуется. Для работы в программе нужна трехмерная геометрия, где мы можем построить в самом программном комплексе *SolidWorks* [132].

Чтобы выполнить дискретизацию по пространству, вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям используемой в расчете декартовой глобальной системы координат модели в *SolidWorks*. Поскольку в *Flow Simulation* используется метод конечных объемов, так что значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, то расчетная сетка описывается ее ячейками, а не узлами, как в методах конечных разностей. Соответственно, ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов. Область, в которой эта сетка строится, так же имеет единообразную для всех задач форму параллелепипеда [131].

В схожих по тематике в работах (определение обтекаемости и вихревых зон) [90-91, 133], численные эксперименты в *SolidWorks* хорошо аппроксимируются с результатами натурных экспериментов, где авторы сравнивали *FloEFD* (*Flow Simulation*) с другими вычислительными ПО.

Примеры валидации представлены в официальном руководстве ПО *FloEFD* [134] (рисунок 1.22), где сравнивали значения КМС (ζ) из справочника (рисунок 1.23) [136], и эпюру скоростей (рисунок 1.24), как и в работах [83, 126-128], но вместо безразмерного параметра y^+ , y^* , определяется по количеству ячеек (n) и по индивидуальным настройкам расчетной сетки.

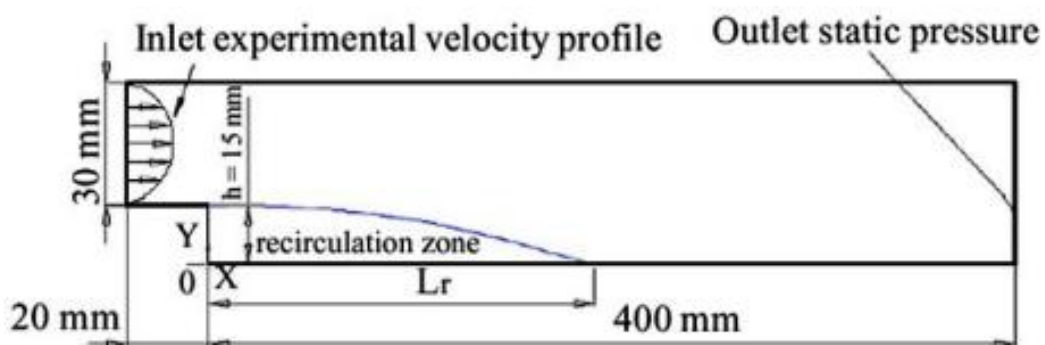


Рисунок 1.22 - Исходные данные расчета для валидации

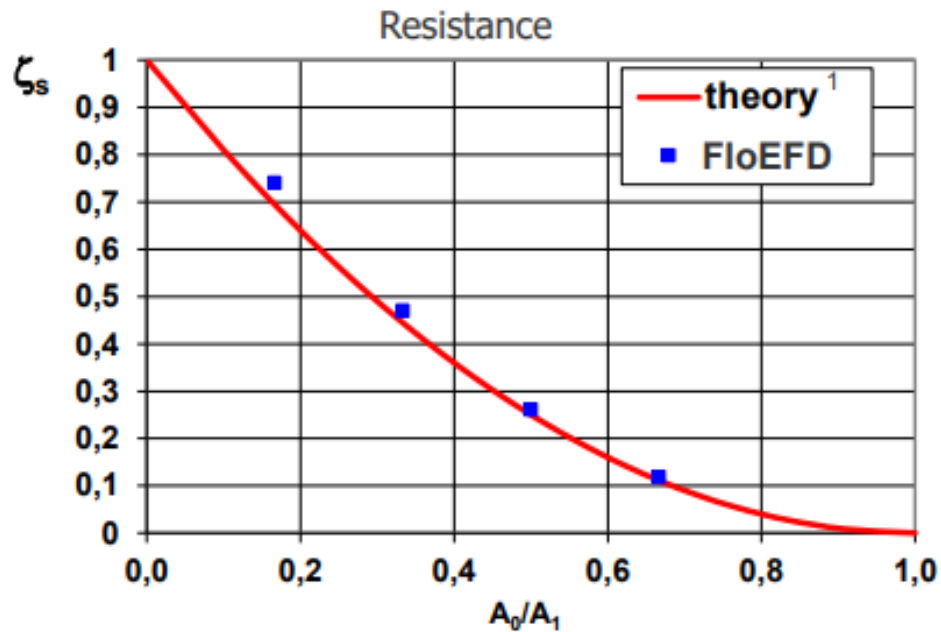


Рисунок 1.23 - Сравнение КМС при разных типоразмерах канала численного и натурального эксперимента

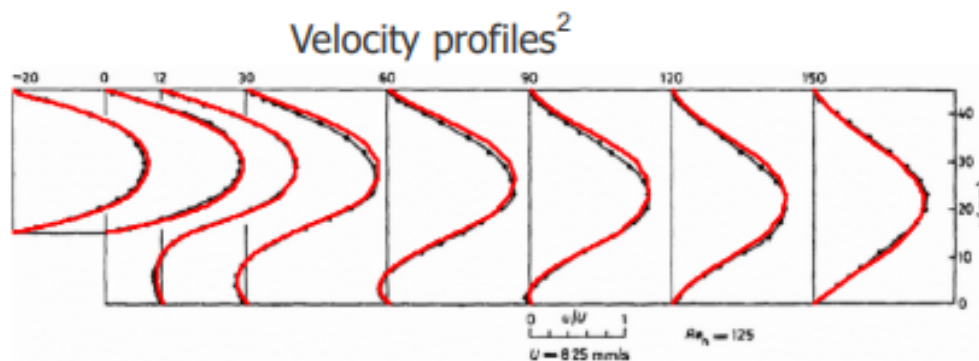


Рисунок 1.24 - Профиль скоростей канала.

В работе [83], верификация и валидация, согласно [135], осуществлялось в следующей последовательности: для верификации расчетной сетки, строилась и подбиралась математическая модель, выбирались контрольные параметры, начальные сетки, моделирование с последующим измельчением расчетной сетки, анализ полученных результатов, выявление уровня адаптации сетки, при котором оказывается незначительное влияние на контрольные параметры. При валидации проводилось сопоставление полученных значений, в результате численного эксперимента с результатами натурального эксперимента. Натурный эксперимент проводился для характерных

и оптимальных конструктивно-режимных параметров рассматриваемого отсоса.

1.4 Выводы по первой главе

1. В результате аналитического обзора требований к условиям труда, компоновке, устройству и техническим решениям локализации источников образования загрязняющих веществ, а также созданию комфортных условий на рабочих местах, выявлено, что вопрос повышения эффективности и снижения энергоемкости систем механической вентиляции остается актуальным.

2. Анализ методов расчета воздушных течений вблизи местных отсосов, методов открытого типа и способов повышения их эффективности, позволяет выявить, что применение полок и выступов может снизить вихреобразование и, соответственно, значение КМС. Необходимо уточнить степень и закономерности влияния характерных размеров вихревых зон на КМС и эффективность улавливания загрязняющих веществ отсосом-раструбом с выступом и тремя полками.

3. С учетом практики численного моделирования в системах промышленной вентиляции были приняты такие методы исследования, как метод дискретных вихрей и *CFD* моделирование. Эти методы обладают простотой, доступностью и высокой точностью при расчетах и моделировании движения пылевоздушных течений. Описаны основные преимущества использования программного комплекса *Solidworks* с решателем *FloEFD* (*Flow Simulation*).

2 ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ С РАСТРУБАМИ С СОСТАВНЫМИ ПОЛКАМИ

Цель настоящей главы – изложение разработанных дискретных математических моделей отрывных течений на входе отсосы раструбы с составными полками, разработанных компьютерных моделей, методов обработки результатов экспериментальных данных и получения регрессионных зависимостей, используемых в представленном диссертационном исследовании.

2.1 Численное моделирование отрыва потока методом дискретных вихрей

Определение скорости воздуха и построение линий тока осуществлялось численным методом решения сингулярных интегральных уравнений при использовании стационарных дискретных бесконечно тонких вихревых колец

Дискретную математическую модель строили при помощи стационарных дискретных вихревых колец без самоиндукции с учетом образования первой и второй вихревых зон с острых кромок A и B (рисунок 2.1) соответственно. Метод дискретных вихрей - это численный метод решения сингулярных интегральных уравнений, математически обоснованный в монографии [88, 89].

Интенсивность (циркуляция) вихревых колец заранее неизвестна. Крестиками изображены расчетные (контрольные точки), где известны граничные значения скорости вдоль направлений внешней нормали. Поскольку граница течения осесимметрична, задача становится двумерной. Координаты любой точки (кольца) задаются расстоянием от входа в отсос-раструб x и расстоянием r до оси симметрии Ox (см. рисунок 2.1). В активном (всасывающем) сечении в расчетных точках известна величина u_0 . В остальных расчетных точках нормальная составляющая скорости равна нулю.

На оси симметрии расположено вихревое кольцо с нулевым радиусом. Число дискретных вихревых колец N , столько же контрольных точек. Шаг дискретности r_h (см. рисунок 2.1) --- это расстояние между двумя соседними вихревыми кольцами, он равномерен. Свободные поверхности тока, сходящиеся с острых кромок A и B , определяются итерационным путем.

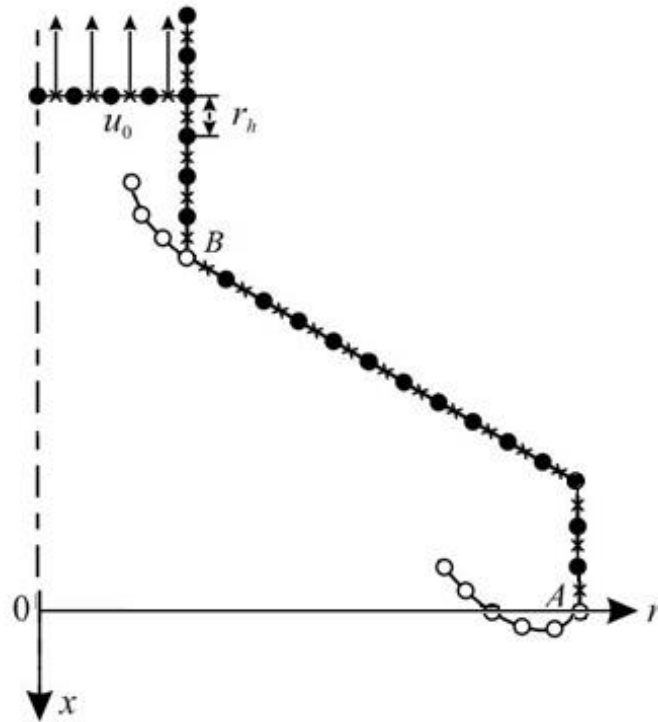


Рисунок 2.1 - Дискретная математическая модель отрывного течения круглого вытяжного зонта с выступом: u_0 - скорость всасывания; r_h - шаг дискретности; ● - присоединенные вихри (вихревые кольца, дискретизирующие непроницаемую поверхность); ○ - свободные вихревые кольца образуют свободную поверхность тока, ограничивающую вихревые зоны

Известная величина нормальной составляющей скорости в точках x^p выражается через неизвестные циркуляции всех вихревых колец в формуле:

$$v_n(x^p) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x^p, \xi^q) + \gamma_1 \sum_{q=1}^{N_{s1}} G(x^p, \zeta_1^q) + \gamma_2 \sum_{q=1}^{N_{s2}} G(x^p, \zeta_2^q). \quad (2.1)$$

где N_{s1} — количество вихревых колец первой свободной поверхности тока; N_{s2} — количество вихревых колец второй свободной поверхности тока; x

p – расчетная точка, $p = 1, 2, \dots, N$; $\Gamma(\xi^q)$ – циркуляция присоединенного вихря в кольце (точке) $\xi^q(\xi_1^q, \xi_2^q)$; γ_1, γ_2 – циркуляции свободных вихревых колец первой и второй свободных поверхностей тока; ζ_1^q, ζ_2^q – точки их размещения; $G(x, \xi)$ – скорость вдоль единичного направления $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$ в точке $x(x_1, x_2)$, вызываемая кольцевым вихрем единичной интенсивности, расположенным в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$:

$$G(x, \xi) = \frac{4(A_1 b + A_2 a)}{b(a-b)\sqrt{a+b}} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta - \frac{4A_2}{b\sqrt{a+b}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}} \text{ при } b \neq 0,$$

$$A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1], t = 2b / (a + b), \quad (2.2)$$

$$G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 n_1}{2a\sqrt{a}} \text{ при } b = 0, 2x_2 \xi_2 = b > 0, a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2.$$

При $\sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2} < r_h$ функция $G(x, \xi) = ((x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1)/(2\pi r_h^2)$. Когда $x = \xi$, функция $G(x, \xi) = 0$.

Неизвестные циркуляции вихревых колец определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (2.1), p изменяется от 1 до N . Искомая скорость в области течения определяется по выражению (2.1), где вместо x^p необходимо использовать координаты этой точки. Итерационный процесс определения свободных поверхностей тока осуществляется следующим образом. На первой итерации строятся линии тока с острых кромок A и B . На них размещаются свободные вихревые кольца с шагом r_h . Далее снова решается система уравнений для определения неизвестных циркуляций вихревых колец и снова строятся линии тока. Итерации производятся до тех пор, пока $|\gamma_1 - \gamma_1'| > \varepsilon$, $|\gamma_2 - \gamma_2'| > \varepsilon$, где штрихом обозначены циркуляции на текущей итерации, а без штриха --- на предыдущей итерации.

Дискретизация границы области течения для случая отрыва при входе в отсос раструб с тремя полками выполнялась аналогично (рисунок 2.2). Сход вихревой пелены и образование вихревых зон осуществлялось с острых кромок M_1, M_3 . В результате численных экспериментов определялись углы

наклона полок, при которых вихрь локализовался только вдоль полки, а значит вихревая пелена замыкалась на точки M_2 , M_4 . Обозначение и расчетные соотношения аналогичны тем, что изложены для отсоса раструба с выступом.

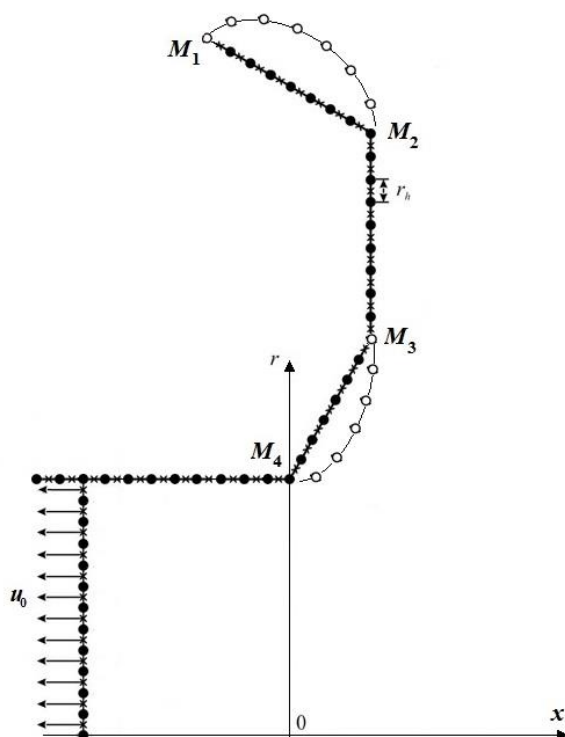


Рисунок 2.2 – Дискретная математическая модель отрывного течения при входе в круглый отсос-раструб с тремя полками

2.2 Численное моделирование в комплексе *SolidWorks*

2.2.1 Разработка компьютерной модели течения воздушных течений при входе в отсос-раструб с выступом с учетом вязкости

Течение к отсосу-раструбу и отрывные зоны на его входе рассчитывались в программном комплексе *SolidWorks* и его *CFD* приложении *Flow Simulation* (FloEFD). Для замыкания основной системы уравнений движения Рейнольдса, использовалась стандартная модель турбулентности « k - ε » [83, 142]. Задача решалась в трехмерной постановке, твердотельная модель, разработанная в программе *SolidWorks*, была загружена во *Flow Simulation* (рисунок 2.3), расчетная внешняя область представляла собой

параллелограмм с размерами: длиной $A = 2,5$ м, шириной $B = 2,4$ м и высотой $C = 2$ м. Длина канала $L = 1,5$ м, радиус $R = 100$ мм, длина полки раструба $d = 500, 300, 200$ мм ($d/R = 5, 3, 2$), углы наклона раструба $\alpha = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$, длина выступа равнялась: $d_v/R = 0; 0,5; 1; 2$.

В качестве граничных условий задавались: канал, раструб и выступ – непроницаемая адиабатическая стенка с абсолютной шероховатостью $0,1$ мм (реальная стенка), вытяжная граница – скорость на выходе $v_0 = 10$ м/с.

Текущей средой (рабочей средой) принят воздух, который задается во всех областях модели, со следующими параметрами: температура $T = 293,2$ К; давление $P_{\text{атм}} = 101325$ Па; динамическая вязкость $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с, интенсивность турбулентности $E = 0,1\%$.

Во *Flow Simulation* по умолчанию течение в разных областях рассчитывается или как турбулентное, или как ламинарное, или как переходное между этими состояниями (в зависимости от характеристик течения). Поэтому по умолчанию в диалоговых окнах или в качестве типа течения задано ламинарное и турбулентное.

Поскольку моделируется изотермическое течение, силы плавучести не учитываются и параметр «гравитация» отключается.

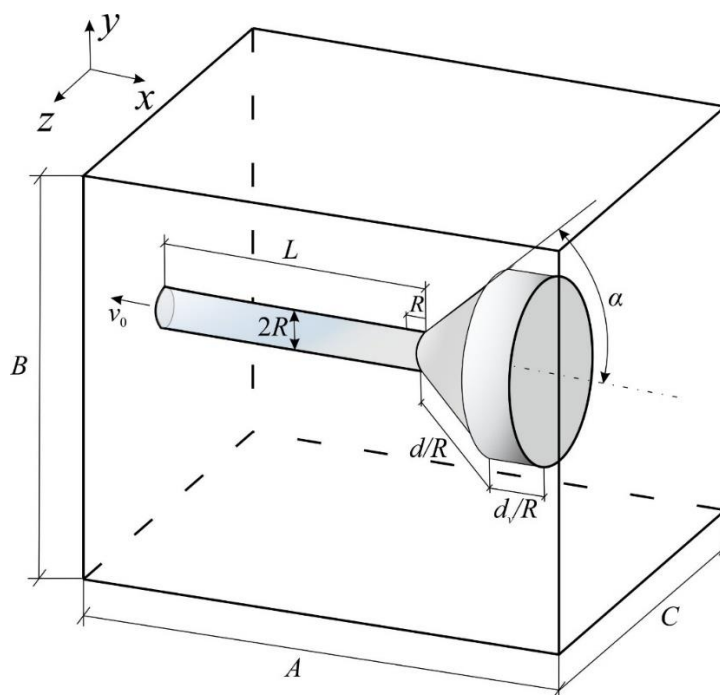


Рисунок 2.3 - Геометрия расчетной области и линии тока течения к раструбу

В модуле *Flow Simulation (FloEFD)* разрешение расчетной области сеткой происходит согласно следующей концепции - во всей области создается «глобальная сетка», параметры которой: размер ячейки – 0,06 мм (число ячеек $\approx 2\ 300$ тыс. шт.). Расчетная область разбивается на части параллельными плоскостями, перпендикулярным осям глобальной системы координат. Для более точного определения очертаний вихревой зоны и потерь давления, в области входа в канал производилось сгущение расчетной сетки путем добавления «локальной сетки», что дополнительно измельчало ячейки сетки в пограничном слое - на границе текучей среды и твердого тела. где размеры ячеек составляли до 0,0146 мм.

Перед решением задач, проводилось исследование на «сеточную зависимость» [83], которое заключается в поэтапном измельчении (адаптации) расчетной сетки. Процедура верификации численной модели состоит в определении изменения (отличия) решений, полученных на разных сетках, у которых размеры расчетных ячеек обычно отличаются в два раза. А процедура валидации – сравнение получаемых результатов с достоверно известным результатом решения тестовой задачи. В данном случае взята задача о течении к круглому отсосу-раструбу с длиной полки $5d$ и углом ее наклона $\alpha = 90^\circ$ без выступа, для которого из справочника [136], известно значение коэффициента местного сопротивления (КМС) $\zeta = 0,5$. Поэтому КМС и взят в качестве сравнивающего параметра.

Значение КМС определялось по формуле 2.3:

$$\zeta = (P_n - P_k) / P_{\text{дин}}. \quad (2.3)$$

где P_n – полное давление на входе в отсос-раструб, Па; P_k – среднее полное давление на выходе из канала, Па; $P_{\text{дин}}$ – среднее динамическое давление в канале, Па.

Для определения КМС по результатам численных исследований, находятся значения полных давлений на входе и на выходе из отсоса-раструба, поскольку на входе в отсос отсутствует избыточное давление, P_n равняется

давлению внешней области $P_{\text{атм}}=101325$ Па, $P_{\text{к}}$ – давление на выходе из канала, определяется с помощью заданной поверхности на выходе из канала на расстоянии равной 1,5 м среднее полное давление, без учета потерь давления на трение, $P_{\text{дин}}$ – определяется по задаваемой на границе скорости v_0 .

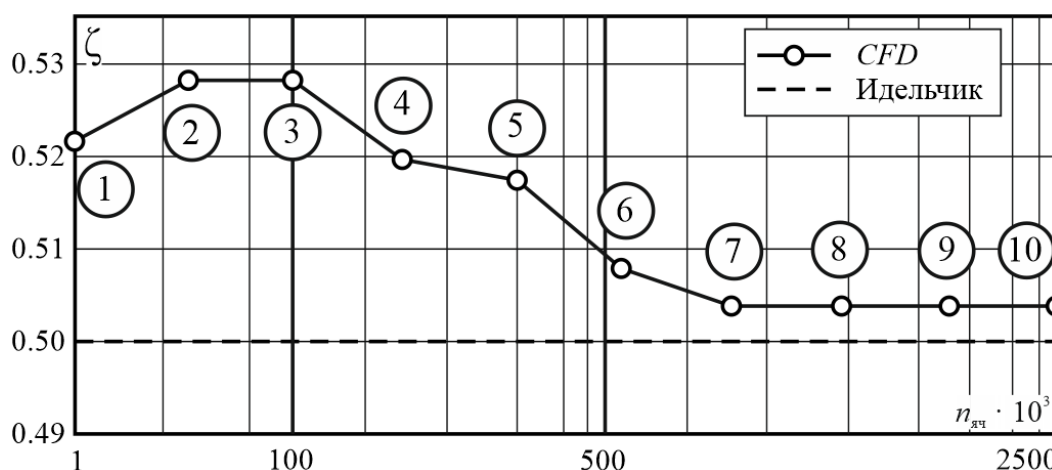


Рисунок 2.4 - Зависимость КМС от количества ячеек, по этапам адаптации расчетной сетки для раструба длиной 5 калибров и угла наклона раструба 90° без выступа

Из рисунка 2.4 видно, что, начиная с 6 этапа, отличие в значениях КМС не превышает 3%, что означает отсутствие сеточной зависимости. В то же время при сравнении с данными из справочника [136] отличие не превышает 9%, это говорит об адекватности принятой компьютерной модели.

2.2.2 Разработка компьютерной модели течения воздушных течений при входе в отсос-раструб с тремя полками с учетом вязкости

Постановка задачи и последовательность идентичны с предыдущей главой 2.2.1. В программном комплексе *Solidworks*, в модуле *Flow Simulation* (*FloEFD*), аналогично, решается задача в пространственной постановке (рисунок 2.5). Размеры внешней области $A = 3$ м, $C = 2$ м. Длина канала составляет $L=1,5$ м. При моделировании щелевого отсоса использовалось прямоугольный канал шириной $2B = 0,2$ м, ограниченный плоскостями, находящимися на расстоянии B . Компьютерная модель геометрически соответствует лабораторной установке, описанной ниже. Для круглого отсоса

радиус $R = 0,1$ мм. Текучая среда – воздух. Заданы следующие внешние условия: температура $t = 293,2$ К; давление $P_{\text{атм}} = 101325$ Па; динамическая вязкость $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с и интенсивность турбулентности $E = 0,1\%$. Для твердого тела условия на стенках – непроницаемая адиабатическая стенка с абсолютной шероховатостью $0,1$ мм.

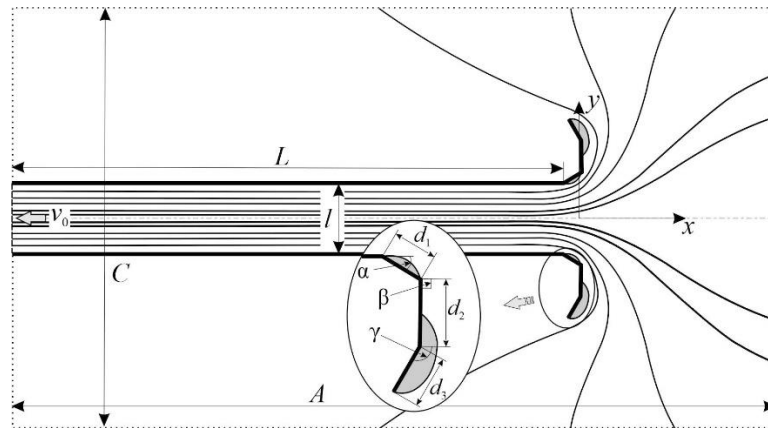


Рисунок 2.5 - Геометрия расчетной области

При решении каждой задачи проводилось исследование на «сеточную сходимость». Последовательно сгущалась первоначальная расчетная сетка и определялось значения КМС (рисунок 2.6).

Сеточная сходимость показана на примере задачи с размерами $d_1=2R$, $d_2=R$, $d_3=2R$ и углами наклона полок $\alpha=30^\circ$, $\gamma=120^\circ$. Значения КМС при поэтапном дроблении расчетной сетки показаны на рисунке 2.6. Начиная с 5 этапа, при количестве ячеек $n \approx 800\,000$, отличие в значениях КМС не превышает 3%, что показывает отсутствие сеточной зависимости.

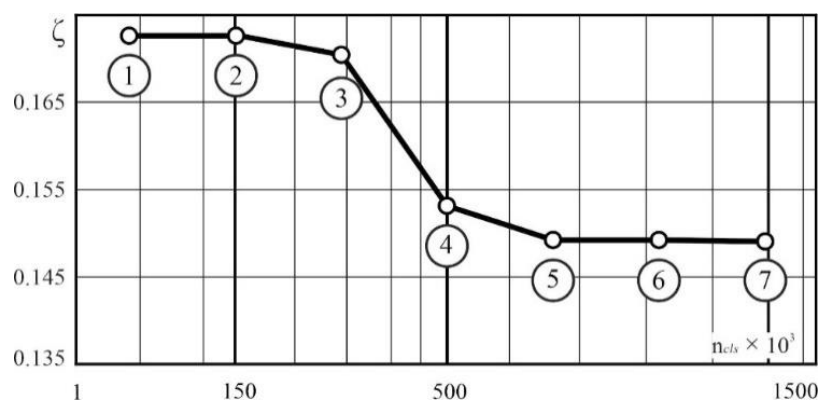


Рисунок 2.6 - Изменение КМС в зависимости от количества ячеек

2.3 Описание экспериментальной установки и методов измерения

Экспериментальная установка (рисунок 2.7) состоит из: исследуемого участка (4) – в котором в двухмерном пространстве устанавливались исследуемые раструбы с выступами. Двумерное пространство было принято для упрощения конструирования, быстрого изменения длин раструба и полок и предполагая, что плоская модель имеет такие же качественные закономерности обтекания полок, как и осесимметричная. Воздуховод (3) длиной 1500 мм, с проходным сечением 200x100 мм, соединен с камерой статического давления (2) и далее через гибкую вставку с радиальным вентилятором ВР-8677М-3,15 ОН (1). Посредством частотного преобразователя *Danfoss VLT Micro Drive* был уменьшен расход вентилятора до значений скоростей в сечении раструба, удобным для измерений и визуализации дымом, частота регулятора зафиксирована на уровне 42,6 Гц.

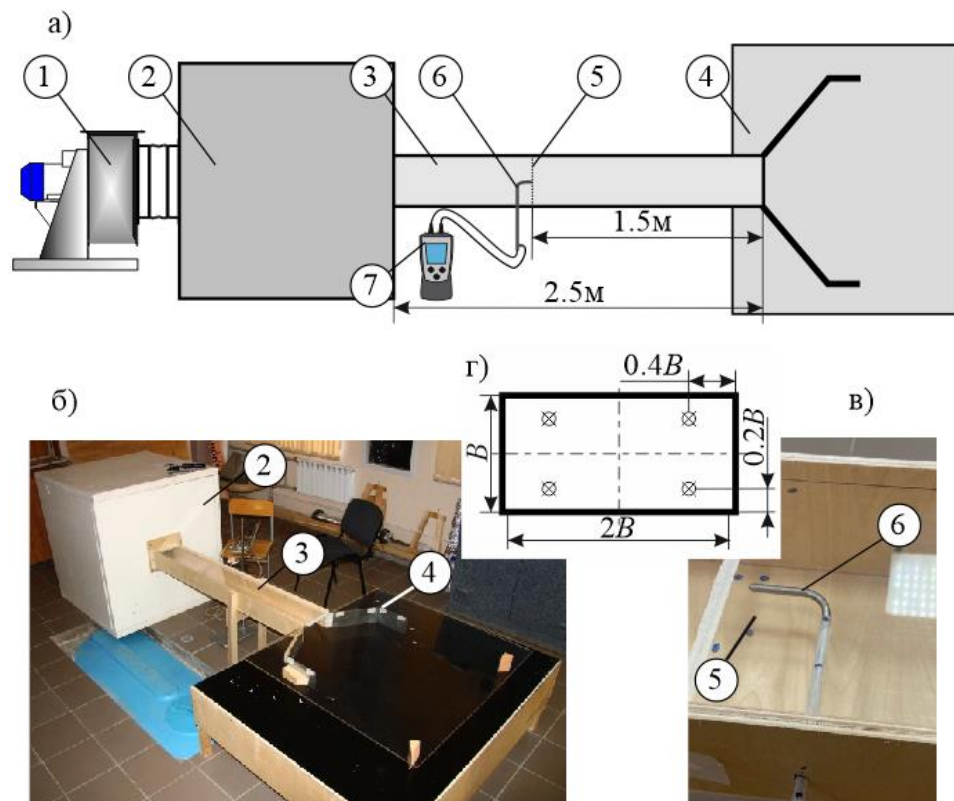


Рисунок 2.7 - Экспериментальная установка: а) схема замера; б) фото установки; в) фото места замера; г) схема точек замера (1 – вентилятор; 2 – камера статического давления; 3 – воздуховод 100x200; 4 – испытательный участок в виде щелевого канала, накрыт сверху органическим стеклом; 5 – измерительное сечение; 6 - трубка Пито-Прандтля; 7 – дифференциальный манометр Testo-510

Камера статического давления, объемом 1 м^3 , служит для уменьшения турбулентности и эффекта закручивания воздуха вентилятором и выполнена из фанеры толщиной 6 мм. Воздуховод для подключения испытательного участка выполнен из фанеры толщиной 10 мм, верхняя часть воздуховода выполнена из органического стекла толщиной 3 мм, для визуализации отрывного потока воздуха на входе в канал после отсоса-раструба (вторая вихревая зона). Стенки раструба на испытательном участке выполнены из оцинкованной стали толщиной 0,5 мм. Замеры полного и динамического давлений в мерном сечении осуществлялись при помощи трубки Пито-Прандтля (6) с тарировочным коэффициентом трубки $k = 1$ и дифференциального манометра Testo 510 (7). Цифровой дифференциальный манометр Testo 510 (внесен в Государственный реестр средств измерений РФ ФГИС «АРШИН») имеет пределы измерения от 0 до 100 гПа и погрешность измерений $\pm 0,03$ гПа (0 до 0,30 гПа).

Точки измерений давлений в поперечном сечении располагались в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 [149], согласно которому в поперечном мерном сечении воздуховода использовалось четыре точки измерения (рисунок 2.7 г). Мерное сечение располагалось на расстоянии 1,0 м от раструба (не менее 6 гидравлических диаметров). По наблюдениям, большую часть расстояния от всасывающего устройства до мерного сечения занимает зона возмущенного потока воздуха, где определить потери полного давления на трение не представляется возможным. Поэтому расстояние до мерного сечения условно считалось зоной влияния местного сопротивления и потери полного давления на трение не учитывались.

Натурные исследования производились после наступления стационарного режима работы вентилятора (15 минут работы вентилятора), после чего измерялись средние полные и динамические давления воздуха в четырех точках мерного сечения (5).

Значения коэффициента местного сопротивления (КМС) определялись аналогично численному исследованию (формула (2.3), где $(P_k - P_n)$ –

осредненное значение перепада полного давления в мерном сечении и атмосферным давлением, Па; $P_{\text{дин}}$ – среднее динамическое давление в канале в мерном сечении, Па.

Для экспериментального исследования щелевого отсоса с тремя полками, выше описанная установка была модернизирована (Рисунок 2.8) и состоит из: исследуемого участка (4).

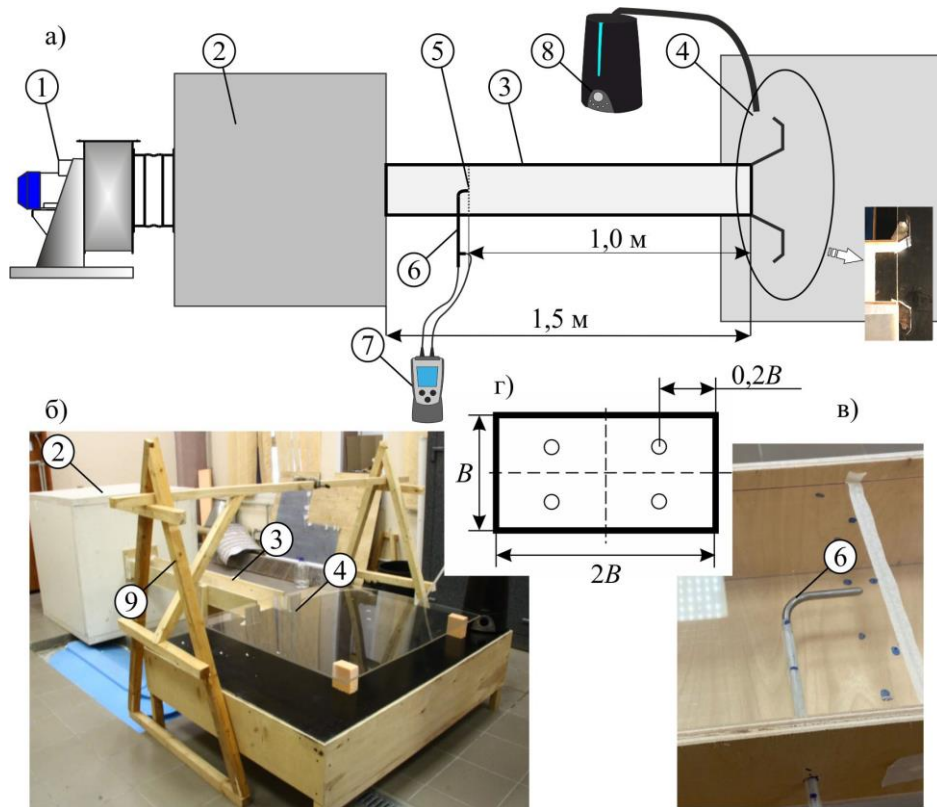


Рисунок 2.8 - Экспериментальная установка: а) схема; б) фото установки; в) фото места замера; г) схема точек замера (1 – вентилятор; 2 – камера статического давления; 3 – воздуховод 100×200; 4 – испытательный участок в виде щелевого канала, накрыт сверху органическим стеклом; 5 – измерительное сечение; 6 - трубка Пито-Прандтля; 7 – дифференциальный манометр Testo-510; 8 – ультразвуковой увлажнитель воздуха Polaris; 9 – деревянная стойка для фотоаппарата

В щелевом пространстве толщиной $B = 0,1$ м устанавливались исследуемые раструбы с тремя полками. Щелевое пространство образовано двумя плоскостями. Нижняя плоскость образована листом фанеры размером $1,5 \times 1,2$ м, покрашенной черной краской. Верхняя плоскость состоит из оргстекла размером $1,1 \times 1$ м, что дает возможность визуализировать отрыв

потока. Воздуховод (3) длиной 1,5м, с проходным сечением 0,2×0,1м, соединен с камерой статического давления (2) и далее через гибкую вставку с радиальным вентилятором ВР-8677М-3,15 ОН (1).

Вычисление потерь давления и КМС производилось аналогично, что и для отсоса с выступом.

Для визуализации отрывной зоны использовался ультразвуковой увлажнитель воздуха *Polaris* (8), генерирующий пар (водную пыль) с температурой близкой к температуре окружающего воздуха. Струя пара по трубке подавалась на внешнюю кромку отсоса-раструба и визуализировала течение. Поток пара подавался таким образом, чтобы он касался внешних стенок отсоса-раструба и сливался с воздушными струйками, огибающими кромку, т.е. очерчивающими границу отрывной зоны. Фиксация очертания вихревой зоны производилась цифровым фотоаппаратом, который располагался на деревянной стойке (9).

2.4 Метод многомерной оптимизации методом покоординатного спуска

Задача многомерной состоит в определении минимума функции:

$$u = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (2.4)$$

Полагается, что функция унимодальная.

Метод покоординатного спуска является одним из простых методов многомерной оптимизации. Поиск экстремума ведется в направлении осей координат, т.е. проще говоря, в процессе поиска минимума меняется только одна координата. Таким образом, многомерная задача сводится к одномерной.

В представленной диссертации этот метод применяется для поиска минимума коэффициента местного сопротивления (ζ), который определяется численным (*CFD*) и экспериментальным путем.

В этом методе фиксируются все переменные, начиная со второй, и делается шаг по первой переменной: $x_1 = x_1 + dx_1$ в направлении убывания

функции, до тех пор, пока функция убывает. Затем фиксируются все переменные, кроме второй и делается шаг по ней: $x_2 = x_2 + dx_2$ в направлении убывания функции, до тех пор, пока функция убывает. И так далее, пока не сделаем шаги по последней переменной.

2.5 Обработка экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей

2.5.1 Проверка воспроизводимости эксперимента

Для проверки воспроизводимости произведены следующие параллельные опыты (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Повторение опытов по определению КМС

N п/п	$\alpha, ^\circ$	dv/R	d/R	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ζ_6	$\bar{\zeta}$
1	60	2	3R	0,149	0,231	0,155	0,161	0,157	0,219	0.179
2	60	1	3R	0,227	0,246	0,173	0,144	0,159	0,200	0.191
3	60	0,5	3R	0,195	0,228	0,210	0,198	0,167	0,177	0.196
4	60	1	2R	0,162	0,157	0,207	0,172	0,135	0,183	0.169
5	60	2	2R	0,149	0,151	0,167	0,146	0,124	0,162	0.150
6	45	1	2R	0,227	0,183	0,185	0,172	0,123	0,172	0.177

Для анализа полученных данных сначала вычислим средние значения в каждой серии опытов – колонка $\bar{\zeta}$ в таблице:

$$\bar{\zeta}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \zeta_{ij} . \quad (2.5)$$

где k – количество повторений каждого опыта, в данном случае $k = 6$.

Далее вычисляет оценку дисперсии в каждой серии опытов:

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (\zeta_{ji} - \bar{\zeta}_j)^2, \quad j = 1, 2, \dots, N . \quad (2.6)$$

где N – количество серий опытов, в данном случае $N = 6$.

Вычисляется максимальное значение дисперсии: $\max s_j^2$ и критерий Кохрена:

$$G_p = \frac{\max s_j^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}. \quad (2.7)$$

Полученное значение критерия Кохрена $G_p = 0,298$ меньше табличного значения $G_T = 0,445$ при количестве степеней свободы $f = N - 1 = 5$ и уровне значимости $0,05$. Таким образом, опыты по определению КМС воспроизводимы.

Оценка дисперсии воспроизводимости:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2 = 0,00089. \quad (2.8)$$

оценка дисперсии среднего значения:

$$s_y^2 = \frac{s_y^2}{k} = 0,00015. \quad (2.9)$$

2.5.2 Вывод уравнения регрессии для значений КМС методом наименьших квадратов

Уравнение регрессии определяется методом наименьших квадратов. Рассмотрим алгоритм получения данного уравнения на примере щелевого отсоса-раструба с выступом по найденным экспериментальным значениям.

В результате проведения экспериментальных исследований сформированы следующие массивы данных, в таблице 2.2 даны экспериментальные значения величины КМС $y = \zeta$ в зависимости от двух переменных $x_1 = \alpha$, $x_2 = d/R$, $x_3 = d_v/R$.

Таблица 2.2 - Массивы экспериментальных данных КМС щелевого отсоса-раструба с выступом

$N \text{ п/п}$	$x_1 = \alpha$	$x_2 = d/R$	$x_3 = d_v/R$	$y = \zeta$
1	$x[1,1]:=90;$	$x[1,2]:=2;$	$x[1,3]:=0;$	$y[1]:=0,318;$
2	$x[2,1]:=90;$	$x[2,2]:=2;$	$x[2,3]:=0,5;$	$y[2]:=0,332;$
3	$x[3,1]:=90;$	$x[3,2]:=2;$	$x[3,3]:=1,0;$	$y[3]:=0,302;$
4	$x[4,1]:=90;$	$x[4,2]:=2;$	$x[4,3]:=2,0;$	$y[4]:=0,207;$
5	$x[5,1]:=90;$	$x[5,2]:=3;$	$x[5,3]:=0;$	$y[5]:=0,402;$
6	$x[6,1]:=90;$	$x[6,2]:=3;$	$x[6,3]:=0,5;$	$y[6]:=0,334;$
7	$x[7,1]:=90;$	$x[7,2]:=3;$	$x[7,3]:=1,0;$	$y[7]:=0,341;$
8	$x[8,1]:=90;$	$x[8,2]:=3;$	$x[8,3]:=2,0;$	$y[8]:=0,300;$
9	$x[9,1]:=90;$	$x[9,2]:=5;$	$x[9,3]:=0;$	$y[9]:=0,359;$
10	$x[10,1]:=90;$	$x[10,2]:=5;$	$x[10,3]:=0,5;$	$y[10]:=0,353;$
11	$x[11,1]:=90;$	$x[11,2]:=5;$	$x[11,3]:=1,0;$	$y[11]:=0,308;$
12	$x[12,1]:=90;$	$x[12,2]:=5;$	$x[12,3]:=2,0;$	$y[12]:=0,309;$
13	$x[13,1]:=75;$	$x[13,2]:=2;$	$x[13,3]:=0;$	$y[13]:=0,272;$
14	$x[14,1]:=75;$	$x[14,2]:=2;$	$x[14,3]:=0,5;$	$y[14]:=0,253;$
15	$x[15,1]:=75;$	$x[15,2]:=2;$	$x[15,3]:=1,0;$	$y[15]:=0,227;$
16	$x[16,1]:=75;$	$x[16,2]:=2;$	$x[16,3]:=2,0;$	$y[16]:=0,200;$
17	$x[17,1]:=75;$	$x[17,2]:=3;$	$x[17,3]:=0;$	$y[17]:=0,264;$
18	$x[18,1]:=75;$	$x[18,2]:=3;$	$x[18,3]:=0,5;$	$y[18]:=0,284;$
19	$x[19,1]:=75;$	$x[19,2]:=3;$	$x[19,3]:=1,0;$	$y[19]:=0,237;$
20	$x[20,1]:=75;$	$x[20,2]:=3;$	$x[20,3]:=2,0;$	$y[20]:=0,157;$
21	$x[21,1]:=75;$	$x[21,2]:=5;$	$x[21,3]:=0;$	$y[21]:=0,276;$
22	$x[22,1]:=75;$	$x[22,2]:=5;$	$x[22,3]:=0,5;$	$y[22]:=0,270;$
23	$x[23,1]:=75;$	$x[23,2]:=5;$	$x[23,3]:=1,0;$	$y[23]:=0,265;$
24	$x[24,1]:=75;$	$x[24,2]:=5;$	$x[24,3]:=2,0;$	$y[24]:=0,254;$
25	$x[25,1]:=60;$	$x[25,2]:=2;$	$x[25,3]:=0;$	$y[25]:=0,213;$

26	$x[26,1]:=60;$	$x[26,2]:=2;$	$x[26,3]:=0,5;$	$y[26]:=0,185;$
27	$x[27,1]:=60;$	$x[27,2]:=2;$	$x[27,3]:=1,0;$	$y[27]:=0,162;$
28	$x[28,1]:=60;$	$x[28,2]:=2;$	$x[28,3]:=2,0;$	$y[28]:=0,149;$
29	$x[29,1]:=60;$	$x[29,2]:=3;$	$x[29,3]:=0;$	$y[29]:=0,206;$
30	$x[30,1]:=60;$	$x[30,2]:=3;$	$x[30,3]:=0,5;$	$y[30]:=0,195;$
31	$x[31,1]:=60;$	$x[31,2]:=3;$	$x[31,3]:=1,0;$	$y[31]:=0,227;$
32	$x[32,1]:=60;$	$x[32,2]:=3;$	$x[32,3]:=2,0;$	$y[32]:=0,149;$
33	$x[33,1]:=60;$	$x[33,2]:=5;$	$x[33,3]:=0;$	$y[33]:=0,217;$
34	$x[34,1]:=60;$	$x[34,2]:=5;$	$x[34,3]:=0,5;$	$y[34]:=0,177;$
35	$x[35,1]:=60;$	$x[35,2]:=5;$	$x[35,3]:=1,0;$	$y[35]:=0,200;$
36	$x[36,1]:=60;$	$x[36,2]:=5;$	$x[36,3]:=2,0;$	$y[36]:=0,219;$
37	$x[37,1]:=45;$	$x[37,2]:=2;$	$x[37,3]:=0;$	$y[37]:=0,226;$
38	$x[38,1]:=45;$	$x[38,2]:=2;$	$x[38,3]:=0,5;$	$y[38]:=0,206;$
39	$x[39,1]:=45;$	$x[39,2]:=2;$	$x[39,3]:=1,0;$	$y[39]:=0,200;$
40	$x[40,1]:=45;$	$x[40,2]:=2;$	$x[40,3]:=2,0;$	$y[40]:=0,150;$
41	$x[41,1]:=45;$	$x[41,2]:=3;$	$x[41,3]:=0;$	$y[41]:=0,130;$
42	$x[42,1]:=45;$	$x[42,2]:=3;$	$x[42,3]:=0,5;$	$y[42]:=0,170;$
43	$x[43,1]:=45;$	$x[43,2]:=3;$	$x[43,3]:=1,0;$	$y[43]:=0,170;$
44	$x[44,1]:=45;$	$x[44,2]:=3;$	$x[44,3]:=2,0;$	$y[44]:=0,150;$
45	$x[45,1]:=45;$	$x[45,2]:=5;$	$x[45,3]:=0;$	$y[45]:=0,172;$
46	$x[46,1]:=45;$	$x[46,2]:=5;$	$x[46,3]:=0,5;$	$y[46]:=0,153;$
47	$x[47,1]:=45;$	$x[47,2]:=5;$	$x[47,3]:=1,0;$	$y[47]:=0,183;$
48	$x[48,1]:=45;$	$x[48,2]:=5;$	$x[48,3]:=2,0;$	$y[48]:=0,165;$
49	$x[49,1]:=30;$	$x[49,2]:=2;$	$x[49,3]:=0;$	$y[49]:=0,166;$
50	$x[50,1]:=30;$	$x[50,2]:=2;$	$x[50,3]:=0,5;$	$y[50]:=0,148;$
51	$x[51,1]:=30;$	$x[51,2]:=2;$	$x[51,3]:=1,0;$	$y[51]:=0,151;$
52	$x[52,1]:=30;$	$x[52,2]:=2;$	$x[52,3]:=2,0;$	$y[52]:=0,146;$
53	$x[53,1]:=30;$	$x[53,2]:=3;$	$x[53,3]:=0;$	$y[53]:=0,089;$

54	x[54,1]:=30;	x[54,2]:=3;	x[54,3]:=0,5;	y[54]:=0,098;
55	x[55,1]:=30;	x[55,2]:=3;	x[55,3]:=1,0;	y[55]:=0,147;
56	x[56,1]:=30;	x[56,2]:=3;	x[56,3]:=2,0;	y[56]:=0,146;
57	x[57,1]:=30;	x[57,2]:=5;	x[57,3]:=0;	y[57]:=0,147;
58	x[58,1]:=30;	x[58,2]:=5;	x[58,3]:=0,5;	y[58]:=0,126;
59	x[59,1]:=30;	x[59,2]:=5;	x[59,3]:=1,0;	y[59]:=0,162;
60	x[60,1]:=30;	x[60,2]:=5;	x[60,3]:=2,0;	y[60]:=0,139;

Количество опытов $N_0 = 60$.

Вид аппроксимирующей функции (уравнение регрессии) будем искать в виде:

$$\varphi(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2.$$

Первая строка матрицы системы уравнений для определения неизвестных коэффициентов:

$$\left(\sum_1^{N_0} 1 \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i1} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i2} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i1} x_{i2} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i1} x_{i3} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i2} x_{i3} \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i1}^2 \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i2}^2 \quad \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 \right).$$

Соответствующий свободный член: $\sum_{i=1}^{N_0} y_i$.

Следующие строки со своими свободными членами получаются умножением под знаком сумм на $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i1} x_{i2}, x_{i1} x_{i3}, x_{i2} x_{i3}, x_{i1}^2, x_{i2}^2, x_{i3}^2$.

Например, последняя строка:

$$\left(\sum_1^{N_0} x_{i3}^2 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 x_{i1} \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 x_{i2} \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^3 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 x_{i1} x_{i2} \sum_{i=1}^{N_0} x_{i1} x_{i3}^3 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i2} x_{i3}^3 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 x_{i1}^2 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 x_{i2}^2 \sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^4 \right)$$

и соответствующий свободный член $\sum_{i=1}^{N_0} x_{i3}^2 y_i$.

Аппроксимация проводилась по всем 60 значениям КМС.

Для оценки значимости полученных коэффициентов использовалась оценка дисперсии

$$s_b^2 t = \frac{s_y^2}{N_0} t = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (y_i - \bar{y})}{N_0 (N_0 - 1)} t = 0.0002, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} y_i}{N_0},$$

где N_0 - количество опытов, y_i - результат опыта.

Критерий Стьюдента при числе степеней свободы $N_0 - 1 = 59$ равен $t = 2.003$.

Коэффициент b_{22} оказался незначимыми. Он меньше 0.0002

Получена следующая формула для КМС:

$$\zeta_{\text{расч}} = 0,1908 - 0,102\alpha - 0,0264d / R + 0,0425d_v / R + 0,0168\alpha d / R - \\ - 0,0521\alpha d_v / R + 0,0123dd_v / R^2 + 0,1248\alpha^2 - 0,0195(d_v / R)^2$$

где α – угол в радианах от $\pi/6$ до $\pi/2$, d изменяется от $2R$ до $5R$, d_v изменяется от 0 до $2R$,

При сравнении дисперсий относительного среднего расчетных и экспериментальных данных по критерию Фишера использовались следующие формулы:

$$F = \frac{\max(s_{y_{\text{расч}}}^2, s_{y_{\text{эксп}}}^2)}{\min(s_{y_{\text{расч}}}^2, s_{y_{\text{эксп}}}^2)}. \quad (2.10)$$

где

$$s_{y_{\text{расч}}}^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{\text{расч}} - \bar{y}^{\text{расч}})^2, \quad s_{y_{\text{эксп}}}^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{\text{эксп}} - \bar{y}^{\text{эксп}})^2. \quad (2.11)$$

В результате расчета $F=1.09$ и он меньше табличного значения 1.54 при уровне значимости 0.05 и количестве степеней свободы $f_1 = f_2 = N_0 - 1 = 59$,

Критерий Стьюдента (сравнение средних значений) определялся по формуле:

$$t = \frac{|\bar{y}^{расч} - \bar{y}^{эксн}|}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_0} [(y_i^{расч} - \bar{y}^{расч})^2 + (y_i^{эксн} - \bar{y}^{эксн})^2]}{(N_0 - 1)N_0}}}. \quad (2.12)$$

и оказался равным 0.409, что меньше табличного значения 1.65 при числе $f = 2N - 2 = 158$.

Коэффициент линейной корреляции Пирсона определялся по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{расч} - \bar{y}^{расч})(y_i^{эксн} - \bar{y}^{эксн})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{расч} - \bar{y}^{расч})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{эксн} - \bar{y}^{эксн})^2}}, \quad (2.13)$$

Полученное значение $r = 0.941$ демонстрируют очень высокую степень тесноты связи между расчетными и экспериментальными данными согласно шкале Чеддока.

Заметим, что существует иной подход для определения адекватности уравнения регрессии. Используется критерий адекватности Фишера, определяемый по формуле [143]:

$$F_p = \frac{\max(s_{ад}^2, s_y^2)}{\min(s_{ад}^2, s_y^2)}. \quad (2.14)$$

где

$$s_{y^{расч}}^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{расч} - \bar{y}^{расч})^2, \quad s_{y^{эксн}}^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{эксн} - \bar{y}^{эксн})^2. \quad (2.15)$$

$s_y^2 = 0.00015$ нами посчитано ранее;

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{N_0 - N} \sum_{i=1}^{N_0} (y_i^{расч} - y_i^{эксн})^2. \quad (2.16)$$

где $N = 10$ – количество коэффициентов уравнения регрессии.

Расчетное значение критерия адекватности Фишера 1,0543, что меньше 1,76 – табличного значения, найденного для уровня значимости 0.05 и числа степеней свободы $N_0 - N = 50$ для $s_{ад}^2$ и 30 для s_y^2 . Уравнение регрессии адекватное.

В учебном пособии [144] критерий адекватности Фишера, определяется по формуле:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = 0.0303$$

Табличное критерия адекватности Фишера $F_T = 1,56$ для уровня значимости 0.05 и числа степеней свободы $N_0 - N = 50$ для $s_{ад}^2$ и 59 для s_y^2 . Отношение $F_T / F_p = 51 > 20$, что также доказывает адекватность полученного уравнения регрессии.

Средняя ошибка аппроксимации:

$$\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \left| \frac{\zeta_i^{расч} - \zeta_i^{эксн}}{\zeta_i^{эксн}} \right| \cdot 100\% = 9,9\%.$$

2.6 Выводы по второй главе

1. 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 [145-146].

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

3. 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.

4. Описана процедура определения многомерной оптимизации – определения минимума функции при помощи метода покоординатного спуска.

5. Составлен вычислительный алгоритм получения уравнения регрессии методом наименьших квадратов для КМС в зависимости от трех факторов с проверкой адекватности и достоверности по статистическим критериям.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВА ПОТОКА ПРИ ВХОДЕ В ВЫТЯЖНЫЕ ЗОНТЫ С ВЫСТУПОМ

Вытяжные зонты рассмотрены в статьях [26, 27, 137, 147] без различных уступов или выступов, которые, как утверждается в ряде источников, повышают их эффективность [140-141]. Конструкции вытяжных зонтов с выступом (рисунок 3.1) рассмотрены в работах [3, 148], но вопрос их эффективности не изучался.

Целью настоящей главы является выявление разными методами влияния выступа, установленного на раструб круглого местного отсоса, на очертания, образующихся вследствие срыва потока, вихревых зон, скорости всасывания и коэффициент местного сопротивления.



Рисунок 3.1 - Вытяжные зонты квадратной и прямоугольной форм с выступом

3.1 Численное моделирование отрыва потока методом дискретных вихрей

Из картин течений вблизи отсосов-раструбов длиной 5 калибров (калибр - радиус всасывающего патрубка) с выступами длиной $d_v = 0,5, 1, 2$ (рисунок 3.2-3.4) следует, что размеры первой вихревой зоны, образующейся при срыве потока из точки A раструба, существенно возрастают при увеличении d_v . Это верно для всех рассмотренных углов наклона раструбов ($90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$). Штрихпунктирной линией показаны границы первой вихревой зоны для случая отсутствия выступа. Здесь и далее все геометрические размеры отнесены к радиусу R . Скорость отнесена к скорости всасывания u_0 . В

частности, растет максимальная длина отхода свободной поверхности тока от направления раструба при увеличении длины выступа. Здесь же замечен небольшой рост радиуса эффективного всасывания. Границы второй вихревой зоны практически не изменяется при оборудовании отсоса-раструба выступом.

Произведен расчет осевой скорости от 0 до 5 калибров (см. рисунок 3.5) для всех рассмотренных углов наклона раструба. Наличие выступа снижает скорость захвата отсоса при увеличении длины выступа. Максимальная величина скорости захвата соответствует случаю отсутствия выступа.

На рисунках 3.6 показано изменение осевой скорости в фиксированных точках при изменении угла наклона раструба. С увеличением длины выступа минимум смещается от 45° к 60° , при этом он становится более глубоким. Для величины $d_v = 2$ и удалении более 0,2 калибра осевая скорость в случае $\alpha = 30^\circ$ становится наибольшей. В остальных случаях наибольшая осевая скорость наблюдается для угла наклона $\alpha = 90^\circ$.

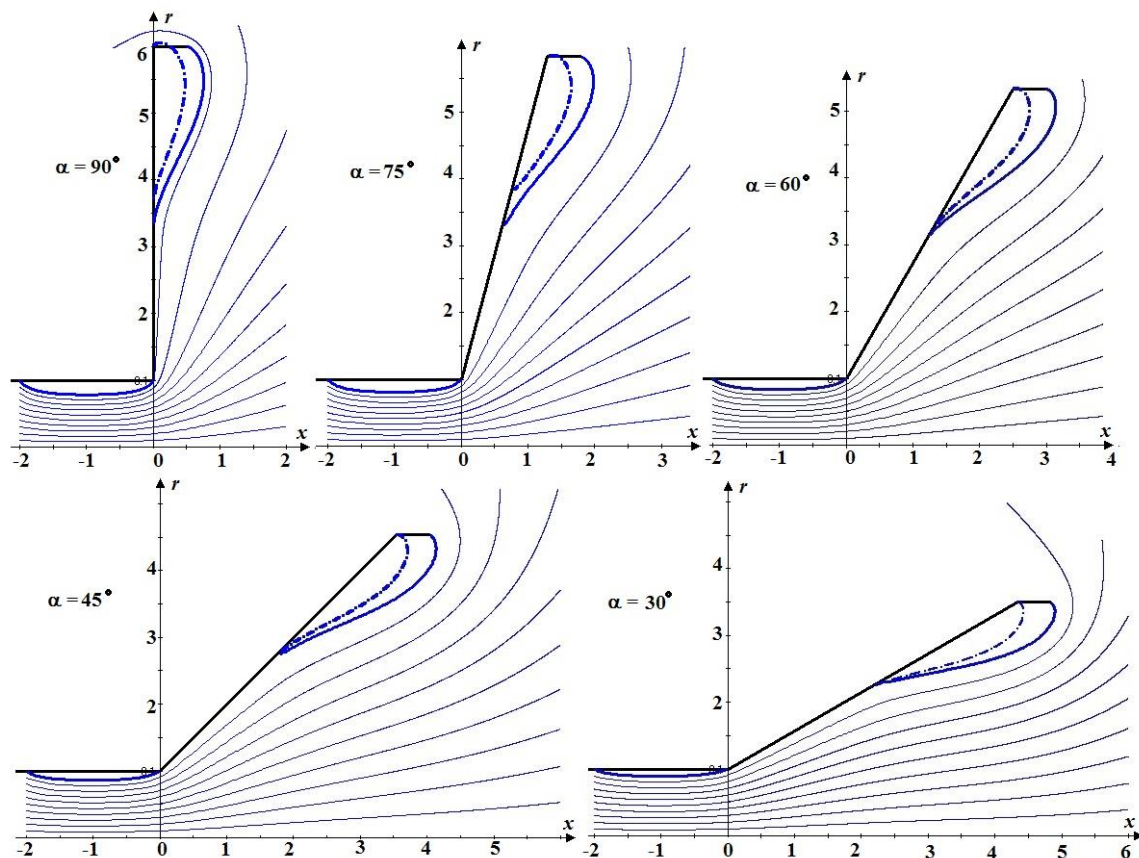


Рисунок 3.2 - Линии тока на входе в круглый отсос-раструб с выступом длиной 0,5R

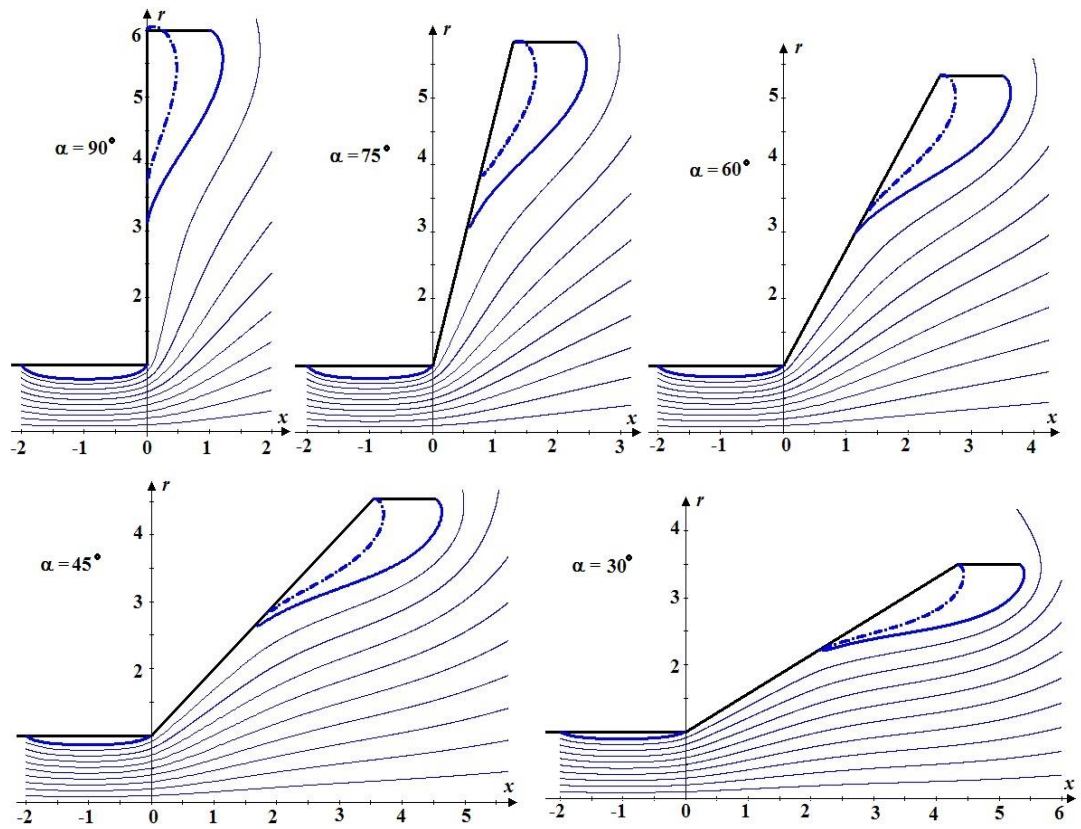


Рисунок 3.3 - Линии тока на входе в круглый отсос-раструб с выступом длиной R

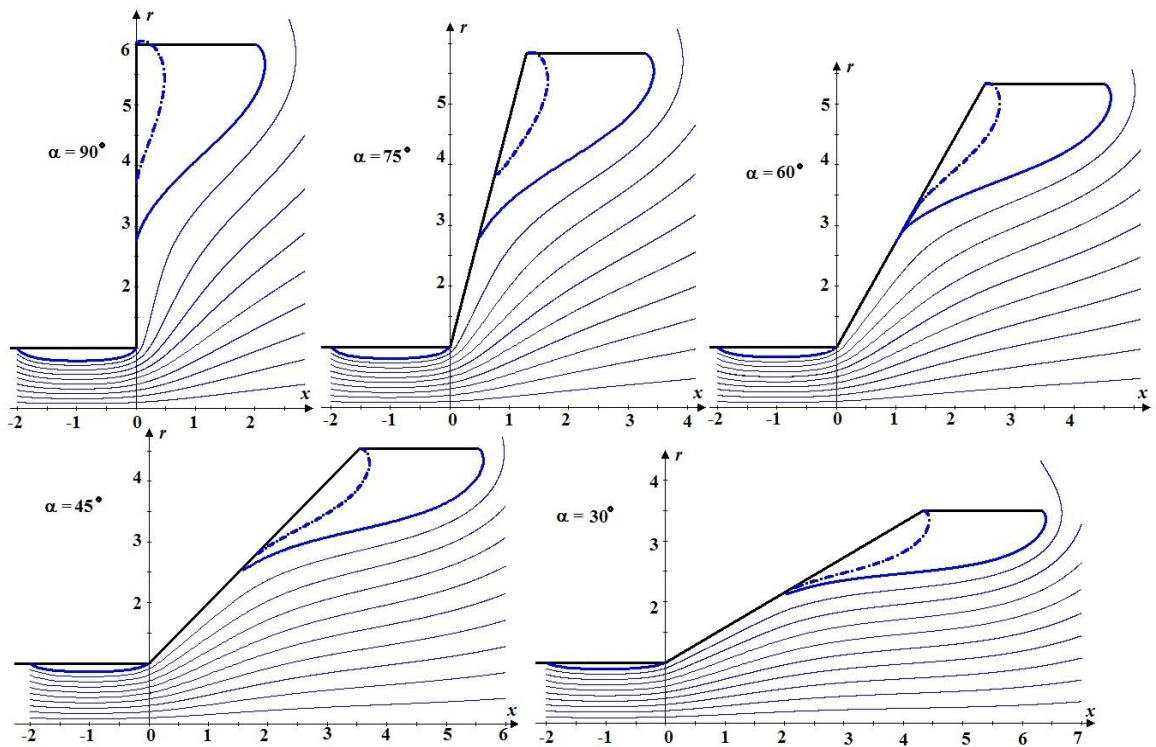


Рисунок 3.4 - Линии тока на входе в круглый отсос-раструб с выступом длиной $2R$.

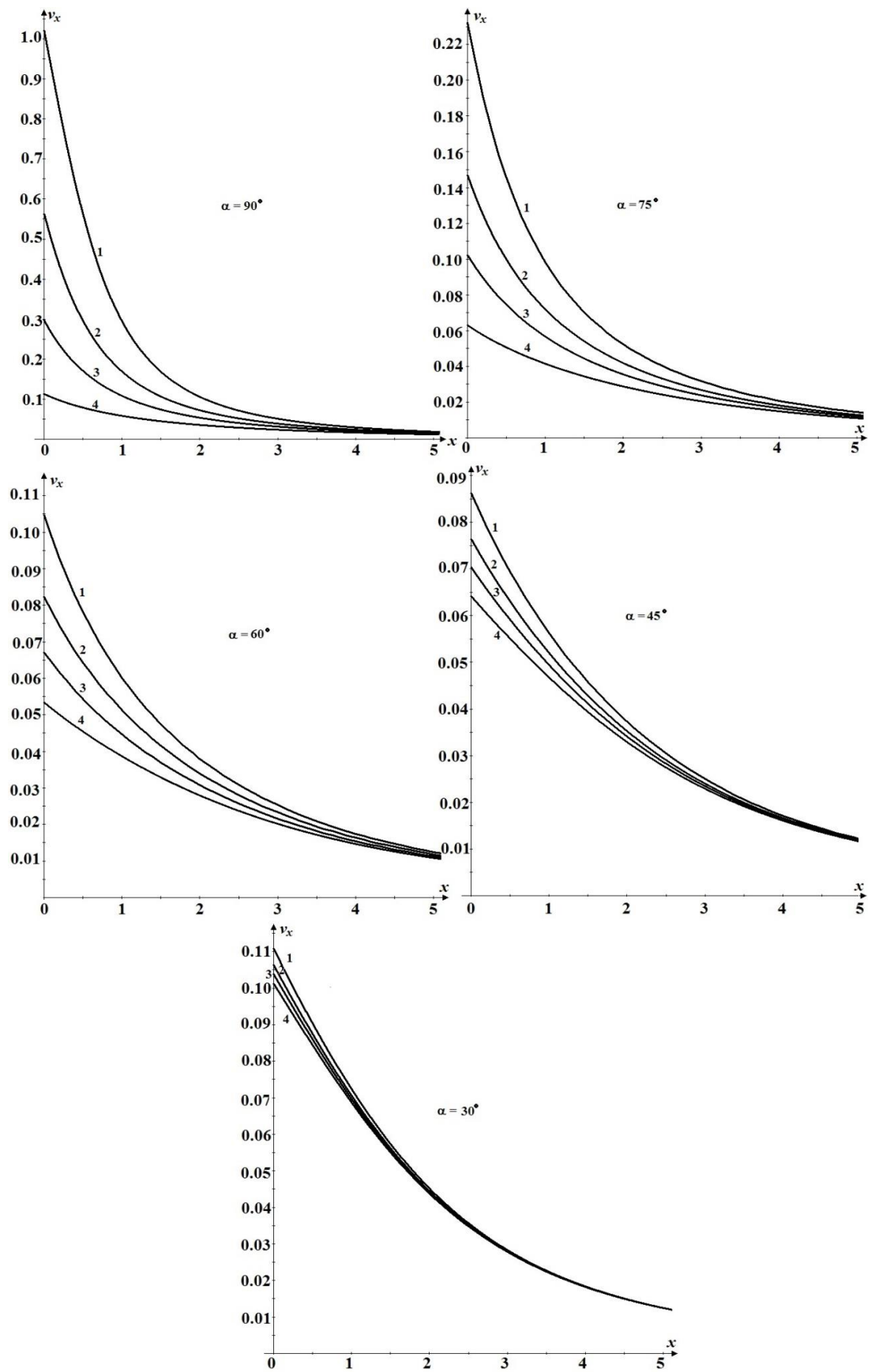


Рисунок 3.5 - Изменение осевой скорости воздуха при разных длинах выступа: 1 - $d_v = 0$; 2 - $d_v = 0,5$; 3 - $d_v = 1$; 4 - $d_v = 2$

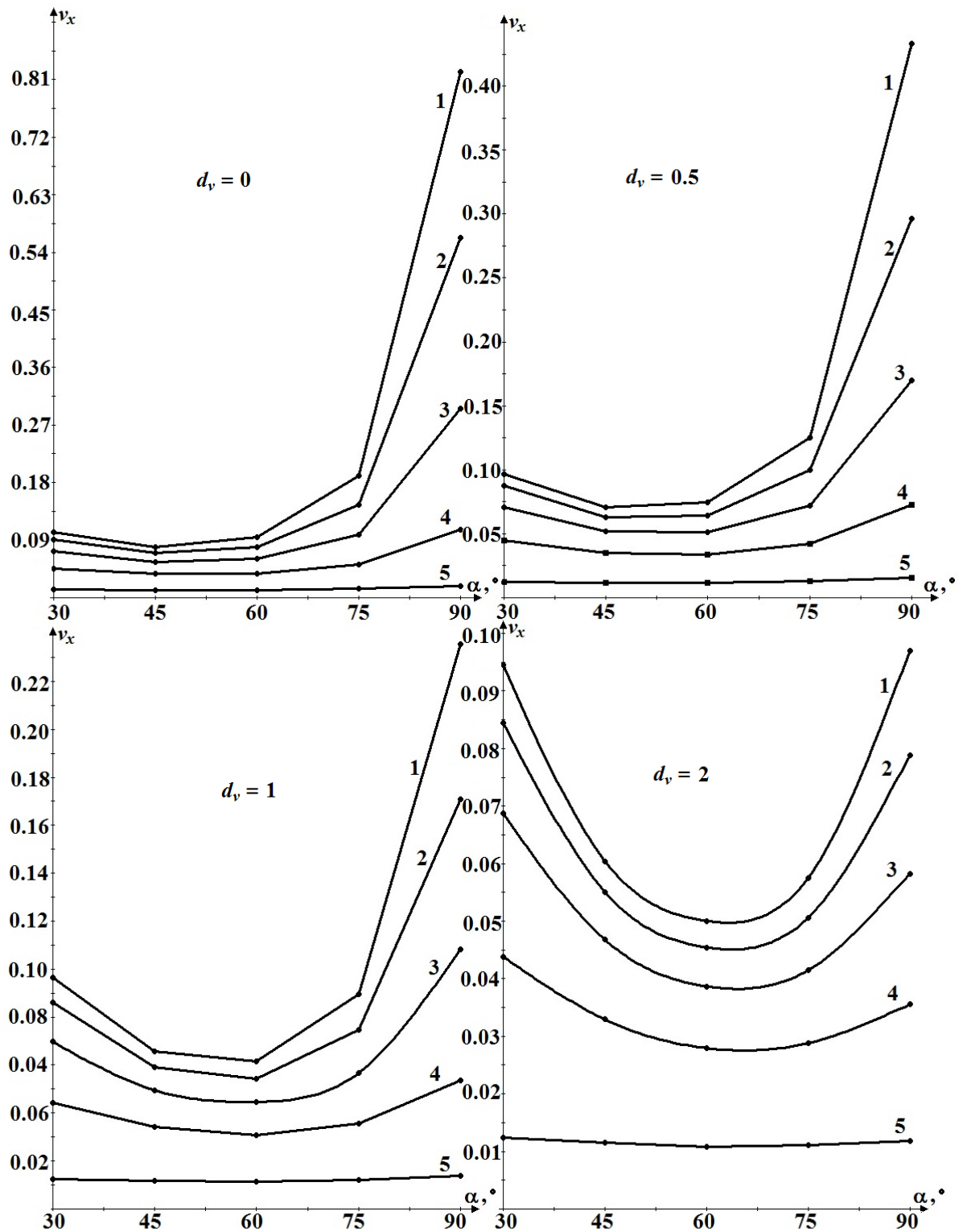


Рисунок 3.6 - Изменение осевой скорости течения в фиксированных точках при изменении угла наклона раструбы и разных длинах выступа. Кривая 1 соответствует случаю удаления от начала координат 0,2, кривая 2 - 0,5, кривая 3 - 1, кривая 4 - 2, кривая 5 - 5

3.2 Численное моделирование отрыва потока методом *CFD*

Сравнение поля скоростей перед круглым отсосом-раструбом, рассчитанное двумя методами (*CFD* и МДВ) и найденное экспериментально [147] представлено на рисунке 3.7, где изображены распределения осевой и радиальной составляющих скоростей воздуха, подтекающего к отсосу-раструбу, для его конструкции с наклоном полки раструба $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$.

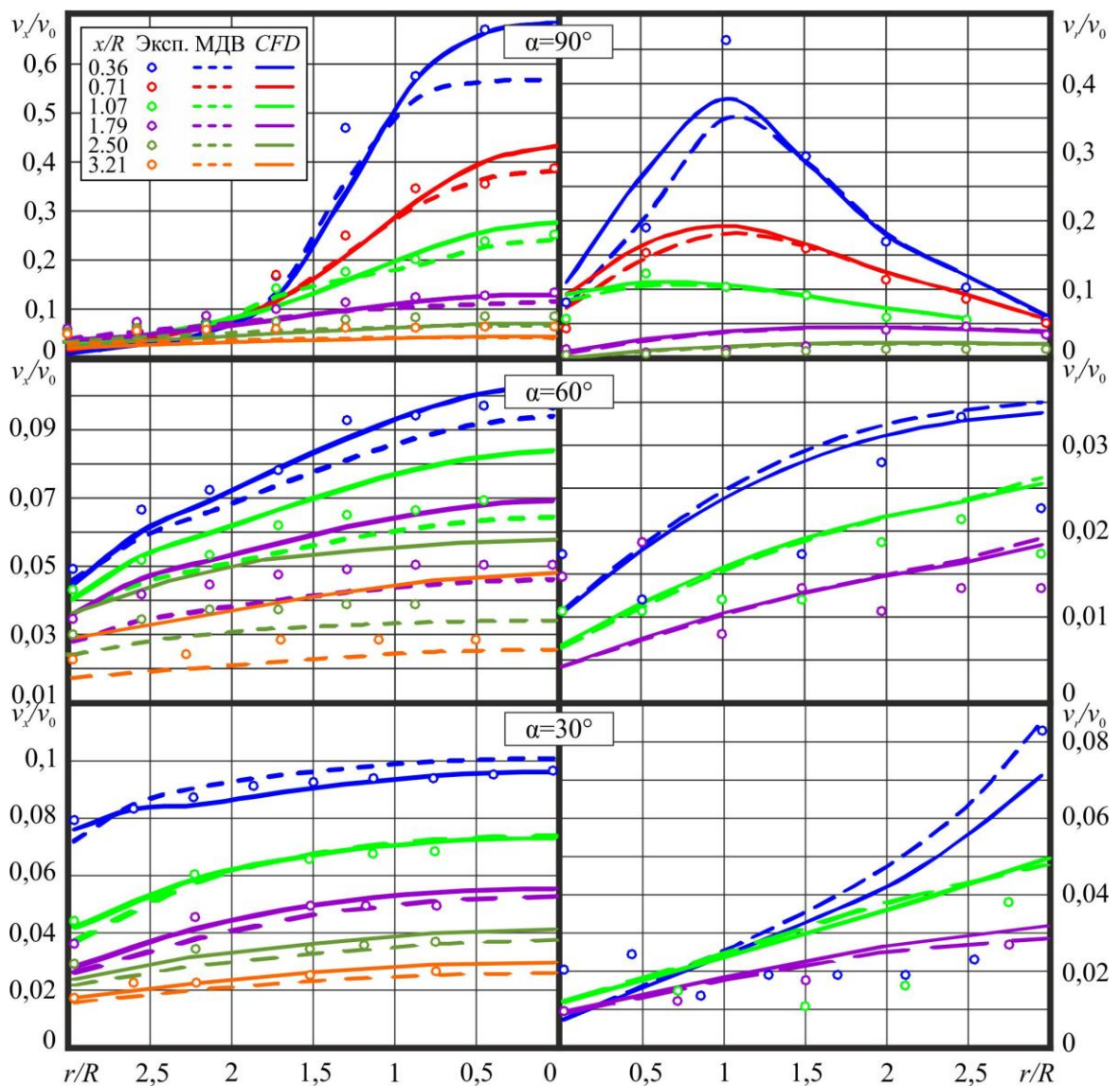


Рисунок 3.7 - Изменения величин осевой и радиальной составляющих скорости при удалении r/R от входа в круглый отсос с раструбом длиной равным 5 калибров и разными углами наклона α

Из сравнения по различным статистическим критериям (таблица 3.1) видно, что расчеты в сравнении с экспериментом хорошо коррелируются – теснота связи этих данных, оцениваемая по критерию Пирсона r высока (от 0,7 до 0,9) или очень высока (от 0,9 до 1) по шкале Чеддока. Более высокие значения r получены при использовании МДВ. По критерию достоверности Стьюдента, который оценивает средние значения сравниваемых величин, также можно заключить о достоверности расчетных значений обоих методов, но более хороший результат показывает МДВ. Однако по критерию адекватности Фишера F расчеты в *SolidWorks (CFD)* имеют меньший разброс относительно среднего (среднее значение составляющих скорости в каждой строке таблицы определялась по точкам сравнения, количество которых указано в 4-й колонке).

Таблица 3.1 - Сравнение расчетных величин, составляющих скорости с экспериментальными данными для отсоса с раструбом длиной 5 калибров

α	Метод расчета	Составляющая скорости	Количество точек сравнения	Коэффициент корреляции Пирсона $r \pm dr$	Критерий Стьюдента t	Критерий Фишера F
90°	МДВ	v_x	55	0,991±0,002	0,290	1,280
90°	CFD	v_x	43	0,989±0,003	0,075	1,002
90°	МДВ	v_r	40	0,966±0,011	0,276	1,337
90°	CFD	v_r	39	0,956±0,014	0,542	1,139
60°	МДВ	v_x	41	0,996±0,001	1,178	1,048
60°	CFD	v_x	41	0,937±0,019	1,460	1,026
60°	МДВ	v_r	24	0,732±0,090	1,307	2,237
60°	CFD	v_r	24	0,726±0,097	1,144	1,946
30°	МДВ	v_x	38	0,990±0,003	0,269	1,271
30°	CFD	v_x	36	0,972±0,009	0,101	1,007
30°	МДВ	v_r	21	0,852±0,006	1,435	1,455
30°	CFD	v_r	20	0,784±0,086	1,225	1,222

При сравнении очертаний первой вихревой зоны, возникающей при входе в отсос-раструб без выступа (рисунок 3.8), заметно, что очертания, рассчитанные при помощи МДВ более близки к экспериментальным картинам

течения [147]. Тем не менее, при сравнении ширины вихревой зоны и радиуса эффективного всасывания, определенных при помощи *SolidWorks*, с экспериментальными значениями получены: коэффициент корреляции $0,9908 \pm 0,0342$; критерий Стьюдента $0,208 < 1,86$ и критерий Фишера $3,181 < 6,39$. Справа от знака неравенства – критические значения соответствующих критериев при количестве 5 сравниваемых величин и уровне значимости 0,05.

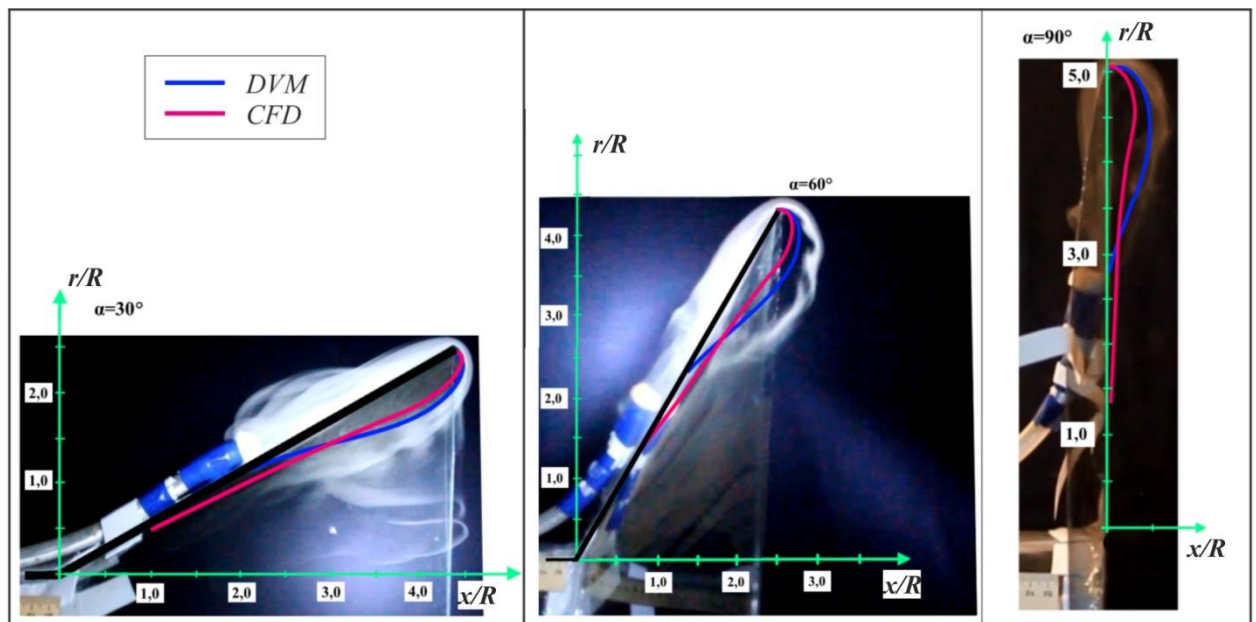


Рисунок 3.8 - Отрыв потока на входе в отсос-раструб

Таким образом адекватность и достоверность численных результатов, получаемых при помощи *CFD* пакета *SolidWorks* приемлемы для практики, поэтому полученная компьютерная модель далее используется для исследования течения к отсосу-раструбу с выступом.

По результатам решения задач с использованием последней адаптации расчетной сетки были определены очертания вихревых зон в зонах выступа и в точке присоединения полки раструба к вытяжному каналу. За очертания вихревой зоны принималась крайняя линия, огибающая вихревую зону, полученная путем визуализации траектории потока воздуха.

Построение осевой скорости подтекания воздуха к отсосу-раструбу, по результатам численного расчета, проведено для конструкции с длиной полки

$d/R = 5$, углами наклона $\alpha = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ и выступами длиной $d_v/R = 0; 0,5; 1; 2$. Из представленных графиков (рисунок 3.9), построенных двумя методами (МДВ и *CFD*), видно, что наличие выступа снижает скорость захвата отсоса при увеличении длины выступа. Сечение $x = 0$ выбрано на срезе раструба, v_0 – скорость в канале. Максимальная величина скорости захвата соответствует случаю отсутствия выступа. Для больших углов наклона раструба $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$ результаты практически совпадают (рисунок 3.8 а, б, в). При малых - $45^\circ, 30^\circ$ имеется небольшое их количественное расхождение (рисунок 3.8 г, д).

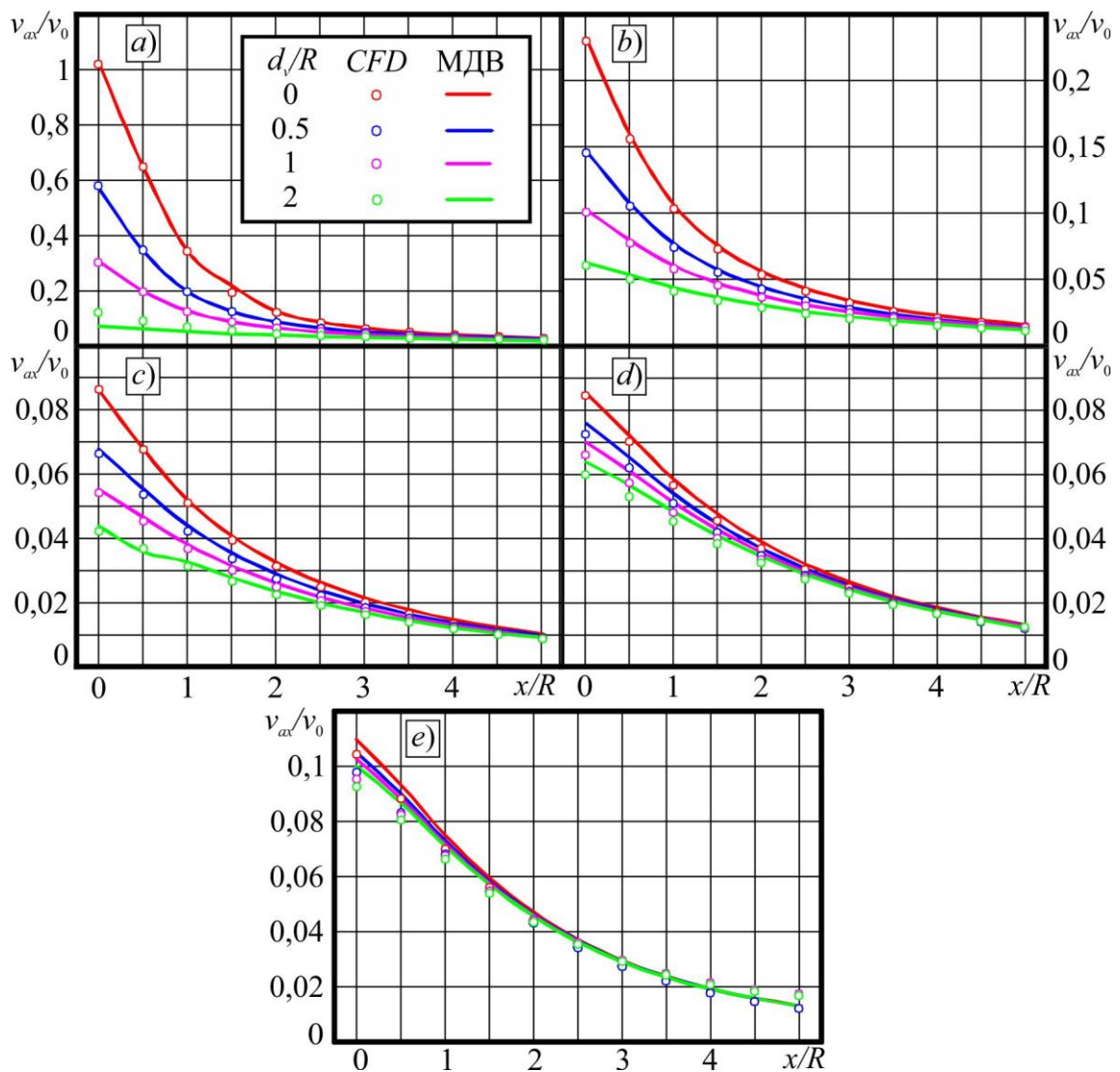


Рисунок 3.9 - Сравнение результатов осевых скоростей, полученных двумя методами, для угла наклона $\alpha = 90^\circ$ при разных длинах выступов d_v/R :

а – $\alpha = 90^\circ$, б – $\alpha = 75^\circ$, в – $\alpha = 60^\circ$, г – $\alpha = 45^\circ$, д – $\alpha = 30^\circ$

Из представленных на рисунках 3.10-3.11 сравнениях очертаний вихревых зон, построенных при наличии и отсутствии выступа видно, что ВЗ увеличиваются – характерные их размеры растут (рисунок 3.12).

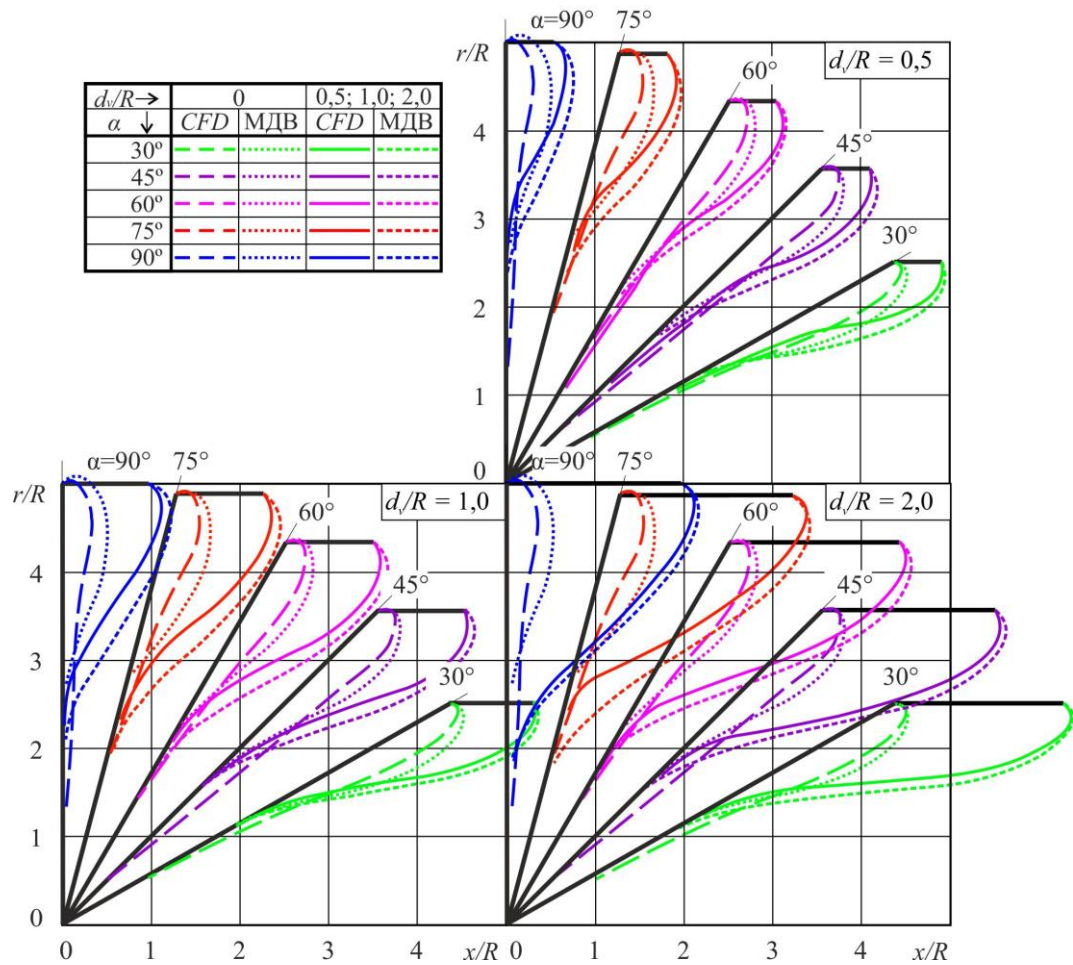


Рисунок 3.10 - Сравнение очертаний первой вихревой зоны на входе в круглый отсос-раструб при разных углах наклона, для длин выступа $d_v/R = 0,5; 1,0; 2,0$

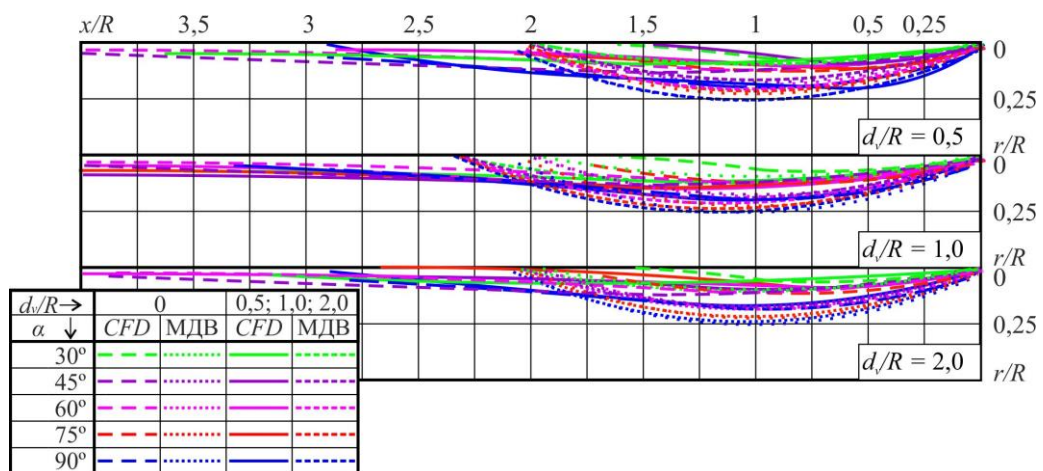


Рисунок 3.11 - Сравнение очертаний второй вихревой зоны на входе в круглый отсос-раструб при разных углах наклона, для длин выступа $d_v/R = 0,5; 1,0; 2,0$

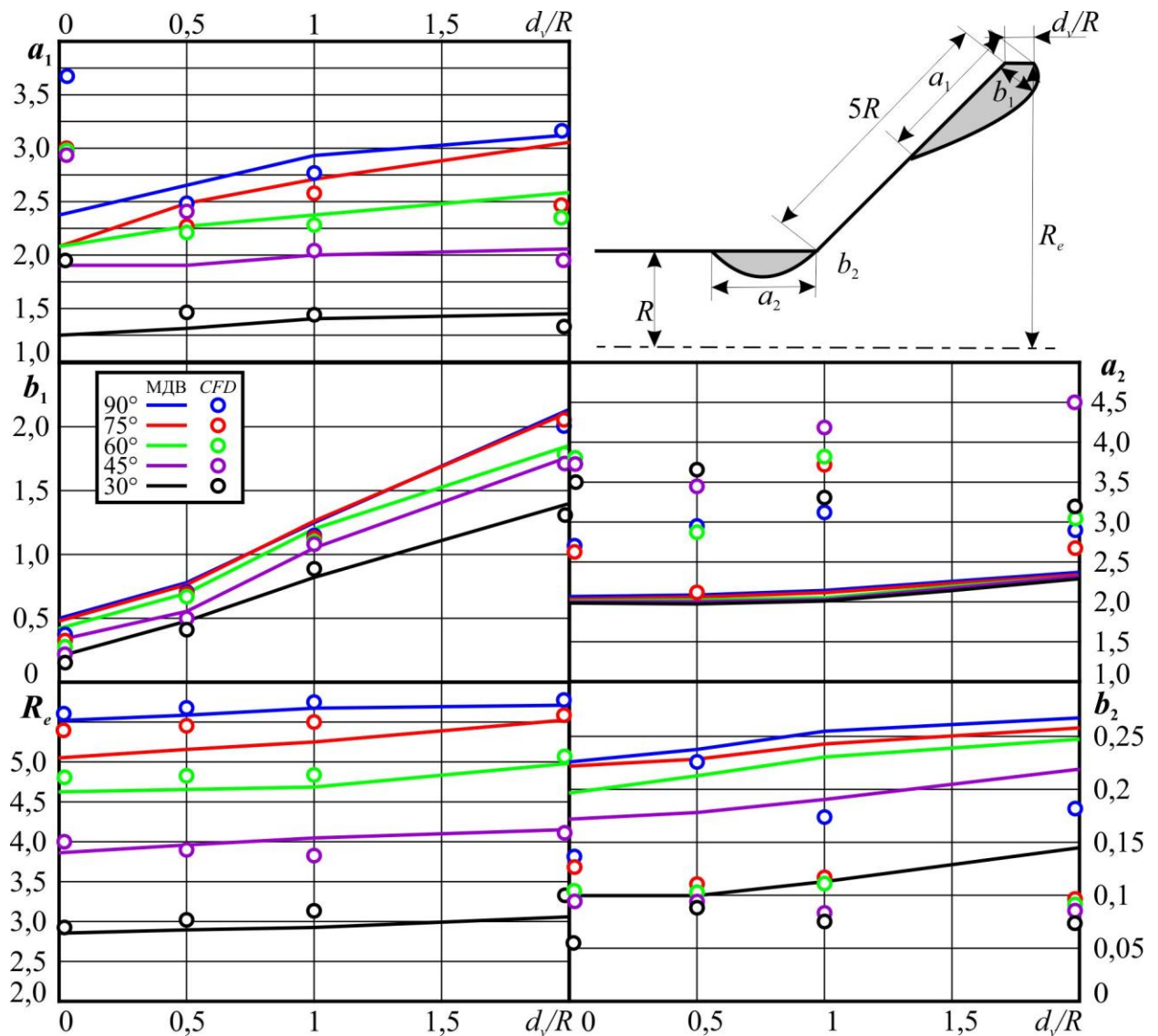


Рисунок 3.12 - Изменение характерных размеров ВЗ в зависимости от угла наклона и длины выступа

Таким образом, из полученных данных следует, что наличие выступа снижает эффективность захвата отсосом-раструбом – осевая скорость, подтекающего к нему воздуха, уменьшается. Увеличивается первая ВЗ, что также не способствует повышению эффективности отсоса, так как улавливаемые загрязняющие вещества могут быть снова вынесены из ВЗ в окружающее пространство. Остаётся проверить, насколько влияет наличие выступа и его длина на КМС отсоса. Поскольку для круглых отсосов-раструбов натурный эксперимент было произвести более сложно, чем для плоской задачи – щелевых отсосов-раструбов, было принято решение произвести исследования влияния на КМС выступов для щелевых отсосов-

раструбов. Предполагается, что, качественно результаты будут те же, что и для круглых отсосов-раструбов. Данные исследования были выполнены на разработанной экспериментальной установке (из параграфа 2.3, рисунок 2.7) и численно при помощи программы *SolidWorks (CFD)*. Были определены зависимости КМС от длины раструба и выступа при разных углах наклона раструба (рисунок 3.13-3.14).

3.3 Экспериментальное определение коэффициента сопротивления

В результате обработки результатов экспериментальных и расчетных величин КМС, методом наименьших квадратов получены аналитические зависимости для определения КМС.

КМС щелевого отсоса-раструба с выступом по найденным экспериментальным значениям получено в главе 2:

$$\zeta_{\text{расч}} = 0,1908 - 0,102\alpha - 0,0264d / R + 0,0425d_v / R + 0,0168\alpha d / R - 0,0521\alpha d_v / R + 0,0123dd_v / R^2 + 0,1248\alpha^2 - 0,0195(d_v / R)^2. \quad (3.1)$$

где α – угол в радианах от $\pi/6$ до $\pi/2$, d изменяется от $2R$ до $5R$, d_v изменяется от 0 до $2R$.

Визуальное сравнение расчетов по данной формуле 3.1 (Рисунок 3.13-3.14) и экспериментальным замерам показывает их хорошее согласование, также, как и сравнение по статистическим критериям. В результате расчета критерий Фишера (сравнений разброса относительного среднего) $F=1,09$ и он меньше табличного значения 1,54 при уровне значимости 0,05 и количестве степеней свободы $f_1 = f_2 = N_0 - 1 = 59$. Критерий Стьюдента (сравнение средних значений) оказался равным 0,409, что меньше табличного значения 1,65 при числе $f = 2N - 2 = 158$. Коэффициент линейной корреляции $r = 0,941$ демонстрируют очень высокую степень тесноты связи между расчетными и экспериментальными данными согласно шкале Чеддока.

КМС щелевого отсоса-раструба с выступом по найденным численным значениям, найденных при помощи программы *SolidWorks (CFD)*:

$$\zeta_{\text{расч}} = 0,1783 - 0,1615\alpha - 0,0065d/R - 0,0038d_v/R + 0,017\alpha d/R - 0,0088\alpha d_v/R + 0,0007dd_v/R^2 + 0,1858\alpha^2 + 0,0006(d/R)^2 + 0,002(d_v/R)^2. \quad (3.2)$$

Здесь при сравнении расчетов по полученной формуле 3.2 и данных вычислительного эксперимента найденные статистические критерии также подтверждают ее адекватность: критерий Фишера $F = 1,079$, критерий Стьюдента $t = 0,604$, коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,964$.

Представлял интерес определить, насколько тесно связаны значения КМС, полученные экспериментально и полученные в результате численного моделирования по *CFD*. Были посчитаны критерии: $r = 0,904$, $t = 1,23$, $F = 1,567$, что демонстрирует их неплохое согласование, хотя визуально (Рисунок 3.13-3.14) различие заметно. Зависимости, найденные при помощи *CFD*, имеют более плавный характер.

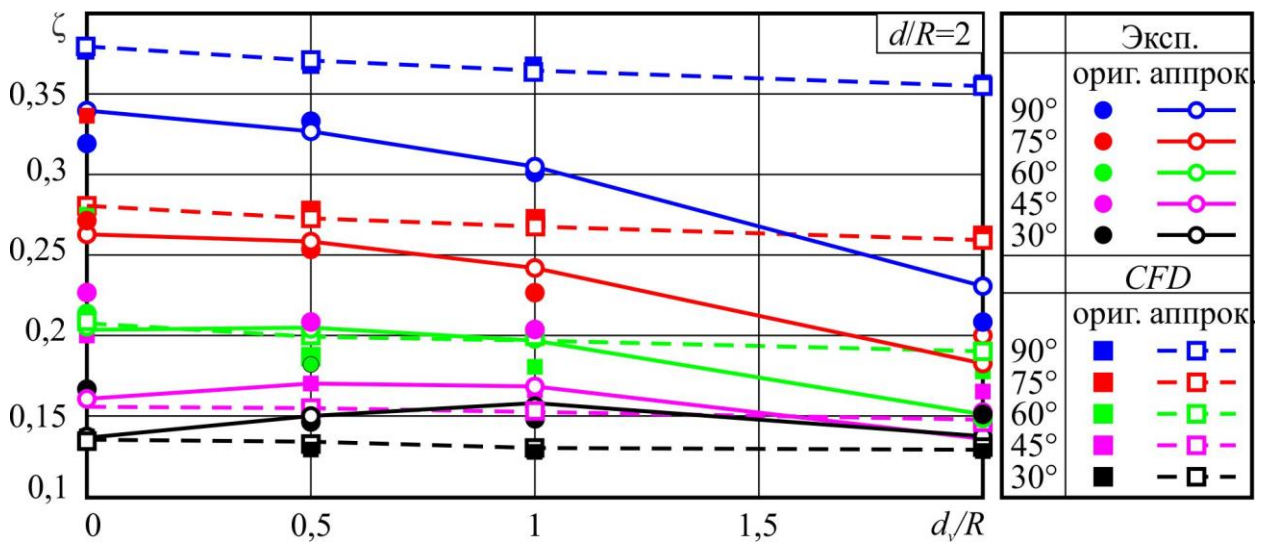
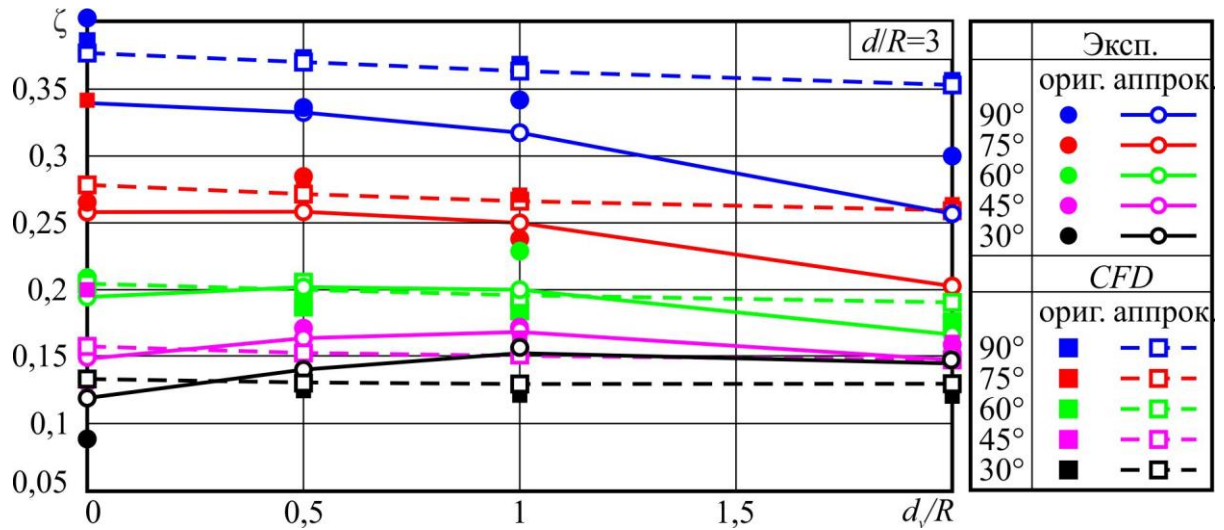


Рисунок 3.13 - Зависимость КМС щелевого отсоса-раструба от длины выступа, при длине раструба $d/R = 2$

а)



б)

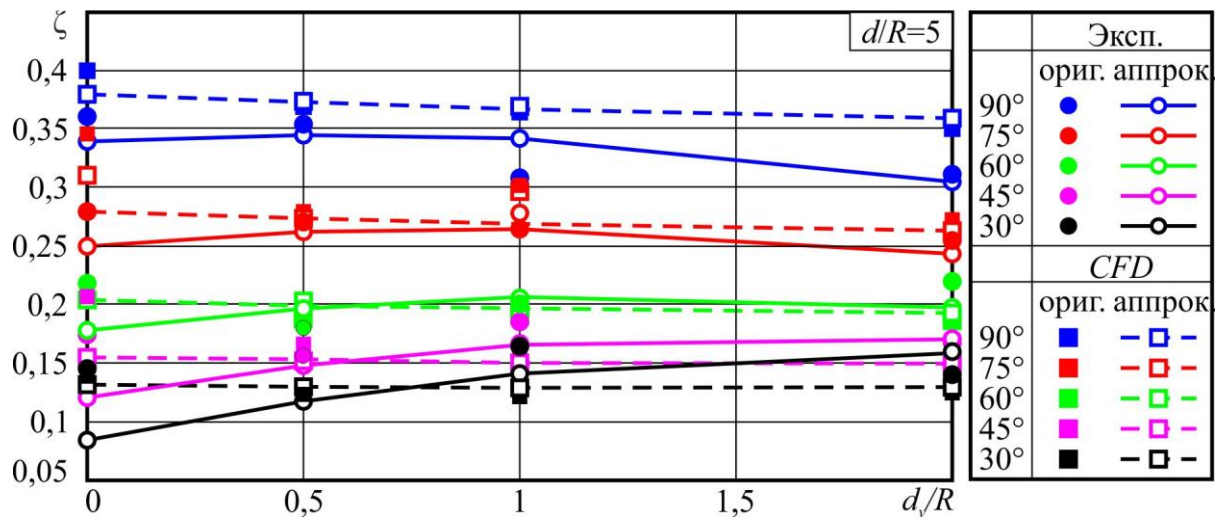


Рисунок 3.14 - Зависимость КМС щелевого отсоса-раструба от длины выступа и разных длинах раструба: а) $d/R = 3$; б) $d/R = 5$

В результате обработки данных вычислительного эксперимента для круглого отсоса-раструба с выступом выражение для определения КМС имеет следующий вид:

$$\zeta_{\text{расч}} = -0,1123 + 0,32\alpha + 0,043d/R + 0,0021d_v/R - 0,0001\alpha d/R - 0,0056\alpha d_v/R - 0,0002dd_v/R^2 + 0,0164\alpha^2 - 0,0055(d/R)^2 - 0,0001(d_v/R)^2. \quad (3.3)$$

Визуальное сравнение расчетов по аппроксимирующей формуле 3.3 и при помощи CFD (Рисунок 3.15) по статистическим критериям ($F = 1,002$,

$t = 0,007$, коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,998$) демонстрирует их хорошее согласование.

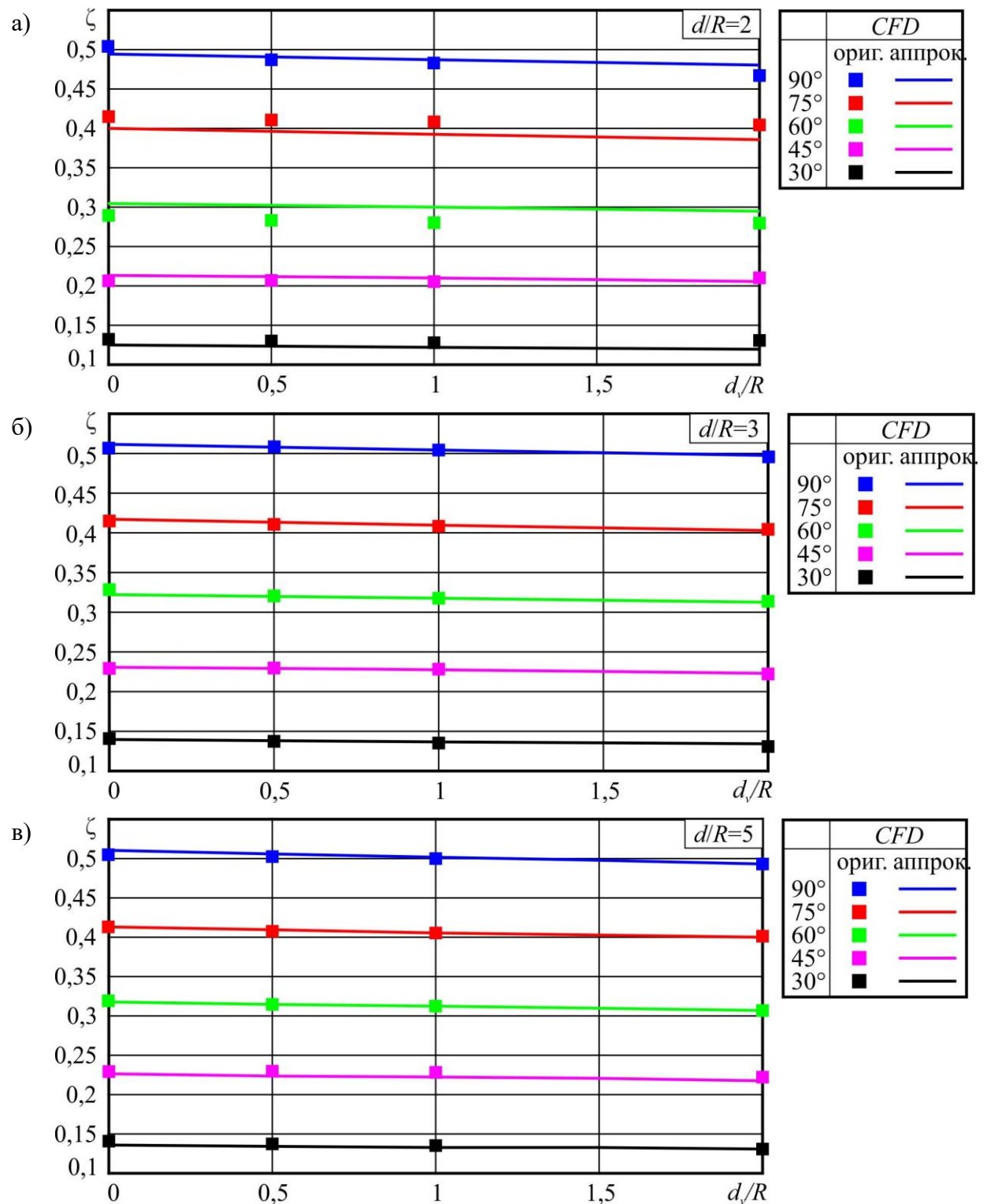


Рисунок 3.15 - Зависимость КМС круглого отсоса-раструба от длины выступа при разных длинах раструба: а) $d/R = 2$; б) $d/R = 3$; в) $d/R = 5$

Таким образом, наличие выступа имеет двоякий характер. С одной стороны, осевая скорость подтекающего к нему воздуха уменьшается, а значит снижается эффективность захвата отсосом загрязняющих веществ. С другой стороны, наличие выступа позволяет снизить КМС, что при постоянной мощности вентилятора увеличивает расход удаляемого воздуха. Дальнейшие исследования будут направлены на исследования зависимостей КМС щелевых и круглых отсосов-раструбов, состоящих из трех полок, которыми возможно заменить однополочные раструбы классической конструкции. Расположение этих трех полок и их геометрические размеры будут определены из условия минимизации КМС.

Заметим, что в работах [26, 27, 137, 147] исследовалось изменение КМС при входе в отсосы-раструбы без выступа. Однако, аналитические выражения для КМС в зависимости от длины и угла наклона раструба приведены не были.

В данной работе в результате обработки экспериментальных данных предлагаем следующие зависимости.

Для круглого раструба:

$$\begin{aligned} \zeta = & 0,4298 - 0,2717\alpha - 0,2862d / B + \\ & + 0,0658\alpha d / B + 0,2547\alpha^2 + 0,0741(d / B)' \end{aligned} \quad (3.4)$$

На графике рисунка 3.16 приведено сравнение расчетных величин КМС (пунктирная линия), полученных по формуле 3.4, и экспериментальных данных И.Е. Идельчика (сплошная линия). Несмотря на то, что расчетные линии несколько "задираются" вверх, статистическая обработка результатов расчета по формуле и экспериментальным значениями показывает их хорошее согласование. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.95$ показывает на очень высокую степень их связи, средние значения совпадают – критерий Стьюдента $t = 0$, критерий Фишера $F = 1.1$ – разброс данных относительно среднего также очень близок. Поэтому для практики вполне можно воспользоваться полученной формулой (в пределах изменения длины полки $0.5 d/R < 2.0$) для вычисления значения КМС.

Для щелевого раструба получена следующая формула:

$$\zeta = 0,8705 - 1,1454\alpha - 0,3233d / B + 0,1763\alpha d / B + 0,5116\alpha^2 + 0,0363(d / B)^2 \quad (3.5)$$

Для щелевого отсоса-раструба экспериментальные значения КМС отсутствуют.

На рисунке 3.17 сплошными линиями изображены численные расчеты КМС по *CFD*, пунктирными – расчет по формуле. Здесь также наблюдается очень высокая теснота связи полученных значений, средние значения и разброс данных относительно средних значений совпадают.

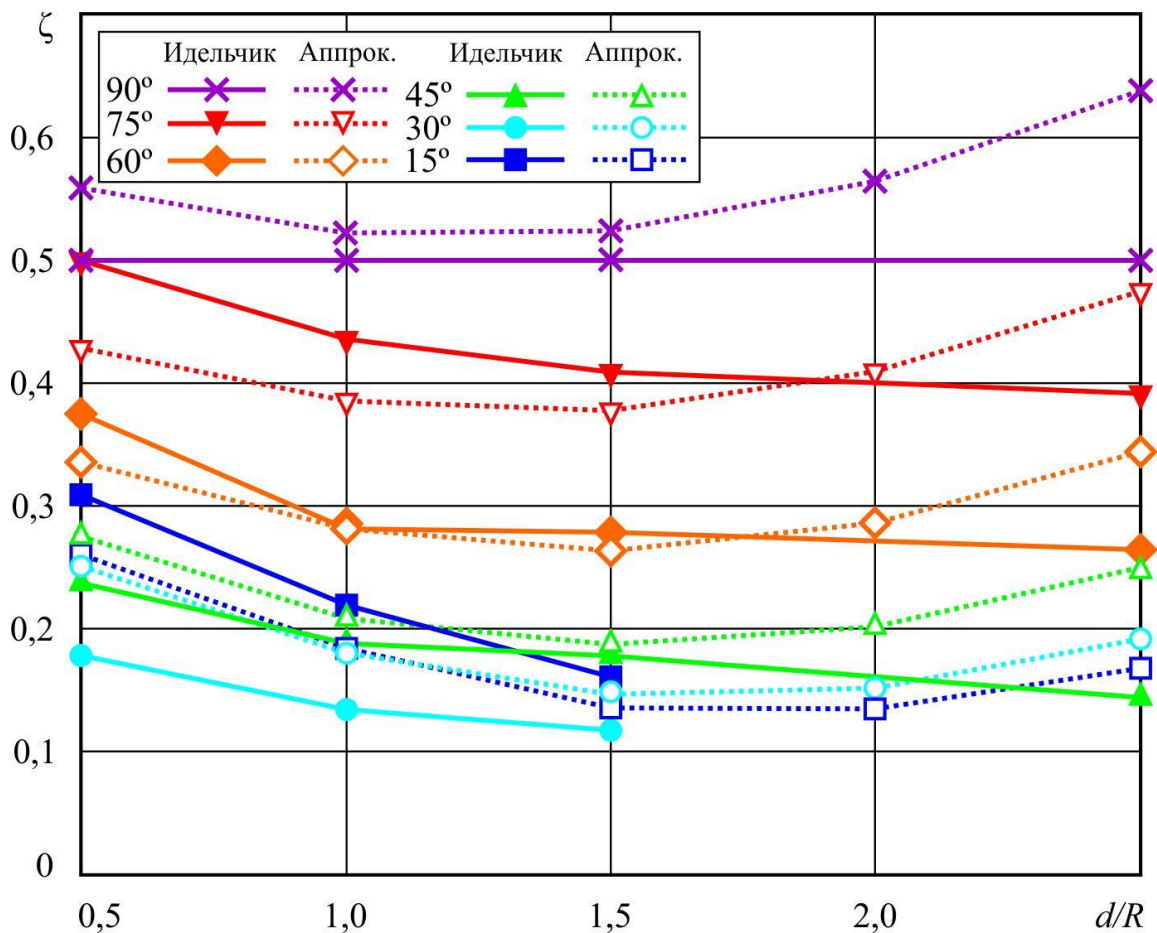


Рисунок 3.16 - Изменение КМС для круглого отсоса-раструба

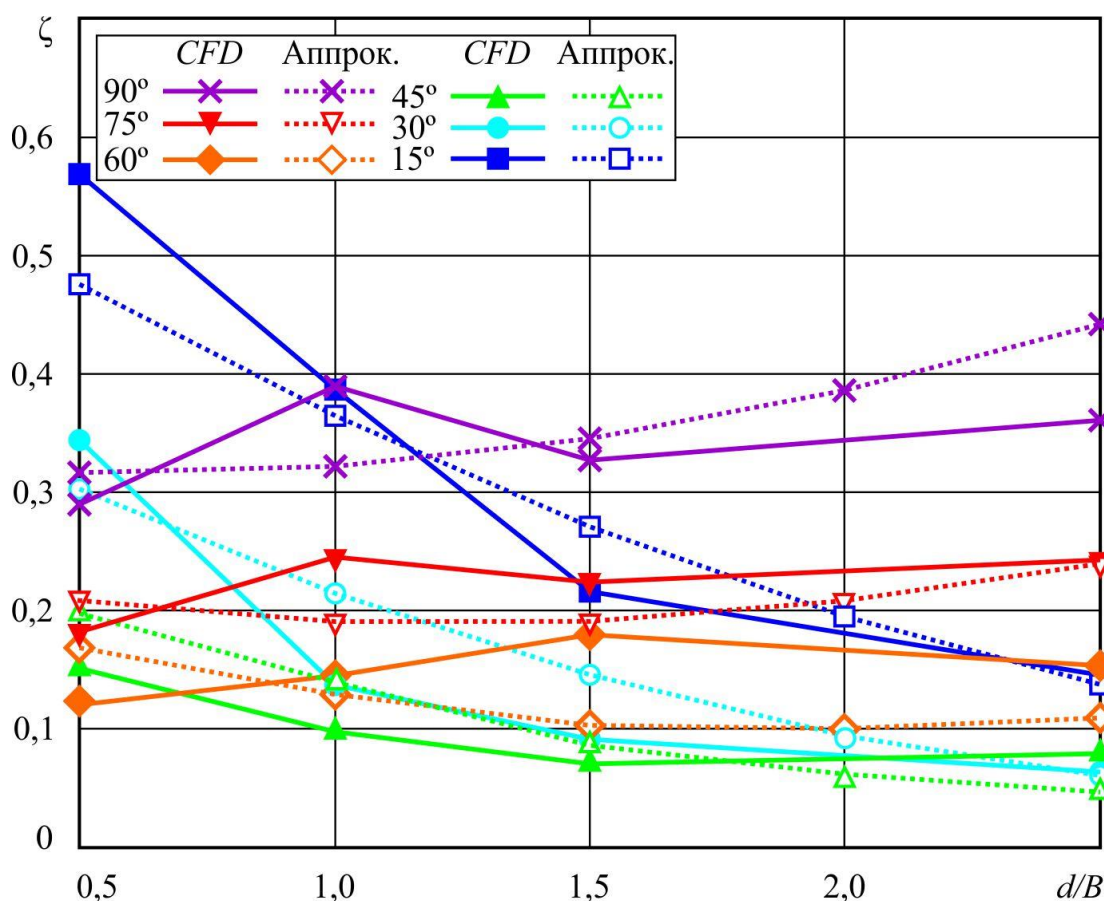


Рисунок 3.17 - Изменение КМС для щелевого отсоса-раструба

3.4 Выводы по третьей главе

1. По разработанной компьютерной программе, основанной на итерационной вычислительной процедуре и с использованием стационарных кольцевых дискретных вихрей, определены границы вихревых зон, возникающих на входе в отсосы-раструбы с выступом. Определено, 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.

2. В рамках математической модели вязкой сжимаемой жидкости в программе *SolidWorks* разработаны компьютерные модели отрывного течения при входе в отсосы-раструбы, которые снабжены выступами.

Проведена подробная валидация компьютерной модели – выполнено сравнение расчетного поля скоростей и очертаний вихревых зон вблизи отсосов-раструбов без выступа. Более близко к экспериментальным данным поле 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 и позволяют определить значения коэффициентов местного сопротивления на входе в отсосы.

3. 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.

4. 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 и скорость захвата загрязняющих веществ отсосом (при условии сохранения расхода воздуха).

4 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВХОДЕ В ОТСОСЫ-РАСТРУБЫ С ТРЕМЯ ПОЛКАМИ

Границы вихревых зон могут быть достаточно протяженные, что может привести к сложности профилирования по этим границам. Использование изломов раструбов может снизить размеры, образующихся вихревых зон, что уже приведет к снижению их аэродинамического сопротивления. Профилирование по найденным границам вихревых зон на протяжении полок между этими изломами приведет еще к большему снижению КМС.

4.1 Численное моделирование при помощи метода дискретных вихрей

Целью параграфа является определение длин полок между изломами, соответствие их углам наклона, способствующих локализации вихря в пределах этих полок, а также границ вихревых зон.

Граница воздушного течения показана на рисунке 4.1. Необходимо найти такие длины d_1 , d_3 полок и углы их наклона α , γ , при которых образующиеся в результате отрыва потока с точек M_1 , M_3 вихри полностью были бы локализованы вдоль этих полок. Это может быть, если свободная вихревая поверхность, сходящая с точек M_1 , M_3 замыкалась в точках M_2 , M_4 . При этом линии тока плавно должны сходиться и замыкаться в этих точках (рисунок 4.2), не образуя изломов с твердыми границами, что препятствует образованию новых вихрей.

Дискретная математическая модель и алгоритм ее численной реализации изложены в главе 2.

Вычислительные эксперименты по разработанной компьютерной программе проводились при $d_2 = 1, 2, 5$ калибров. Калибр – это радиус R всасывающего круглого канала, в расчетах $R = 0,1$ м. Далее результаты представлены в безразмерном виде - все геометрические размеры отнесены к R .

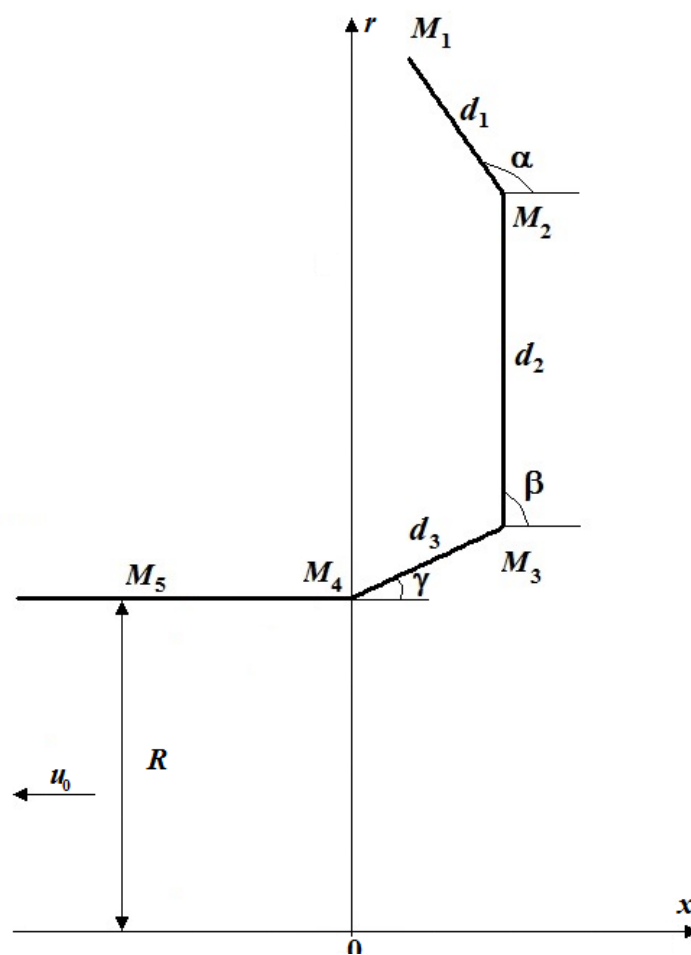


Рисунок 4.1 - Круглый вытяжной зонт с изломами для локализации вихрей

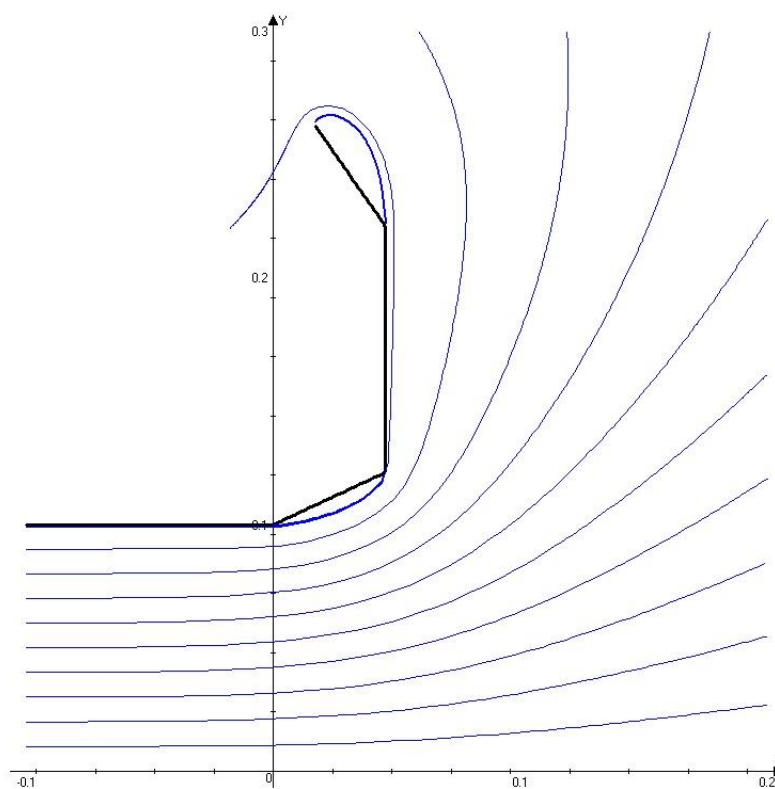


Рисунок 4.2 - Линии тока на входе в раструб с тремя полками

Найдены закономерности изменения углов наклона α , γ от длин полок d_1 , d_3 , при которых происходит локализация вихреобразований вдоль этих полок. При этом границы вихревых зон плавно примыкают к точкам излома M_1 , M_2 и M_3 , M_4 . Граница первой вихревой зоны образуется на в точке M_1 по направления M_2, M_1 и замыкается в точке M_2 вдоль направления M_2, M_3 , вторая вихревая зона образуется на в точке M_3 по направления M_2, M_3 и замыкается в точке M_4 вдоль направления M_4, M_5 . Углы наклона α , γ плавно убывают при увеличении длин $d_1 = d_3$ для всех рассмотренных длин d_2 и угла наклона $\beta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Графики зависимостей угла наклона γ от $d_1 = d_3$ с точность до 1 градуса совпадают при разных длинах d_2 . Полученные графики зависимостей (рисунок 4.3) позволяют определить размеры полок и углы их наклона, позволяющие снизить вихреобразование и соответственно КМС входа отсосов - раструбов. По найденным границам вихревых зон (рисунки 4.4 – 4.6) можно спрофилировать раструб, что позволит еще более снизить КМС и предотвратить вынос загрязняющих веществ из зоны вихреобразования. Из рисунков 4.4 – 4.6 видно, что размеры второй вихревой зоны растут при увеличении угла β и длины d_3 и практически не зависят от d_2 . Размеры первой вихревой зоны схожи между собой, но меняют свое место расположение при изменении угла β . Размеры первой вихревой зоны увеличиваются при росте длины d_2 . Это заметно, если изобразить ее границы в системе координат отрезка M_1M_2 – начало координат в точке M_1 , а ось ординат направлена вдоль M_1M_2 (рисунок 4.7). От угла наклона β границы первой вихревой зоны практически не зависят. На рисунке 4.7 изображены границы для $\beta = 30^\circ$. Для углов наклона $\beta = 60^\circ$ и 90° линии границы накладываются на изображенные на Рисунок8 линии при соответствии величин d_1 и d_2 .

Приближенная формула для определения границы первой вихревой зоны в системе координат (рисунок 4.7) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 x &= d_1 / 1,3 \cos t \sin(0,5t - 0,25\pi) \\
 y &= d_1 \sin t \sin(0,5t - 0,25\pi) \\
 1,5\pi &\leq t \leq 2,5\pi
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Аналитические формулы для границ второй ВЗ в системе координат рисунков 4.4-4.7 при $0 \leq x \leq d_3$. приведены в таблице 4.1.

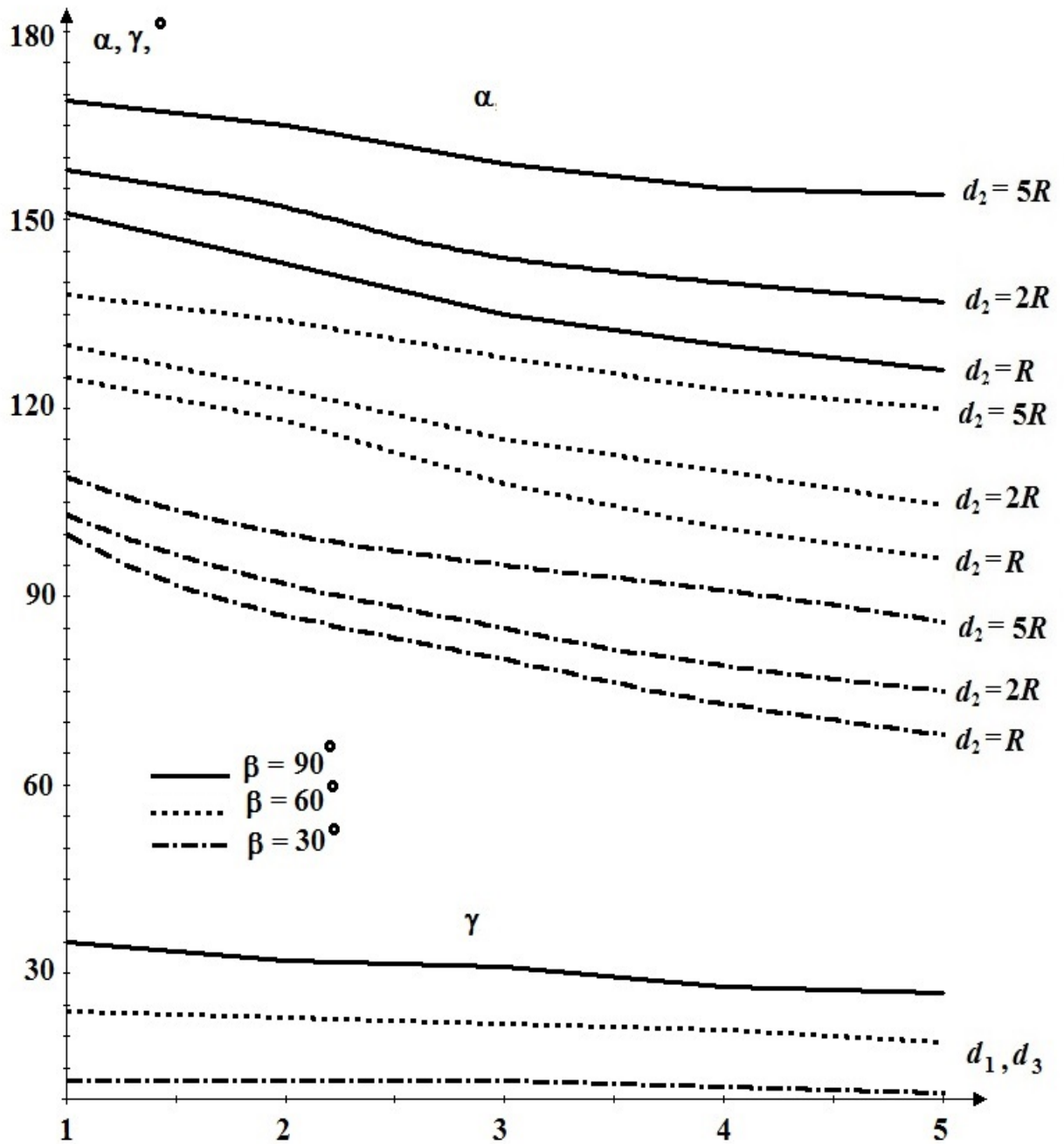


Рисунок 4.3 - Зависимость между длинами полок раструба и углами их наклона

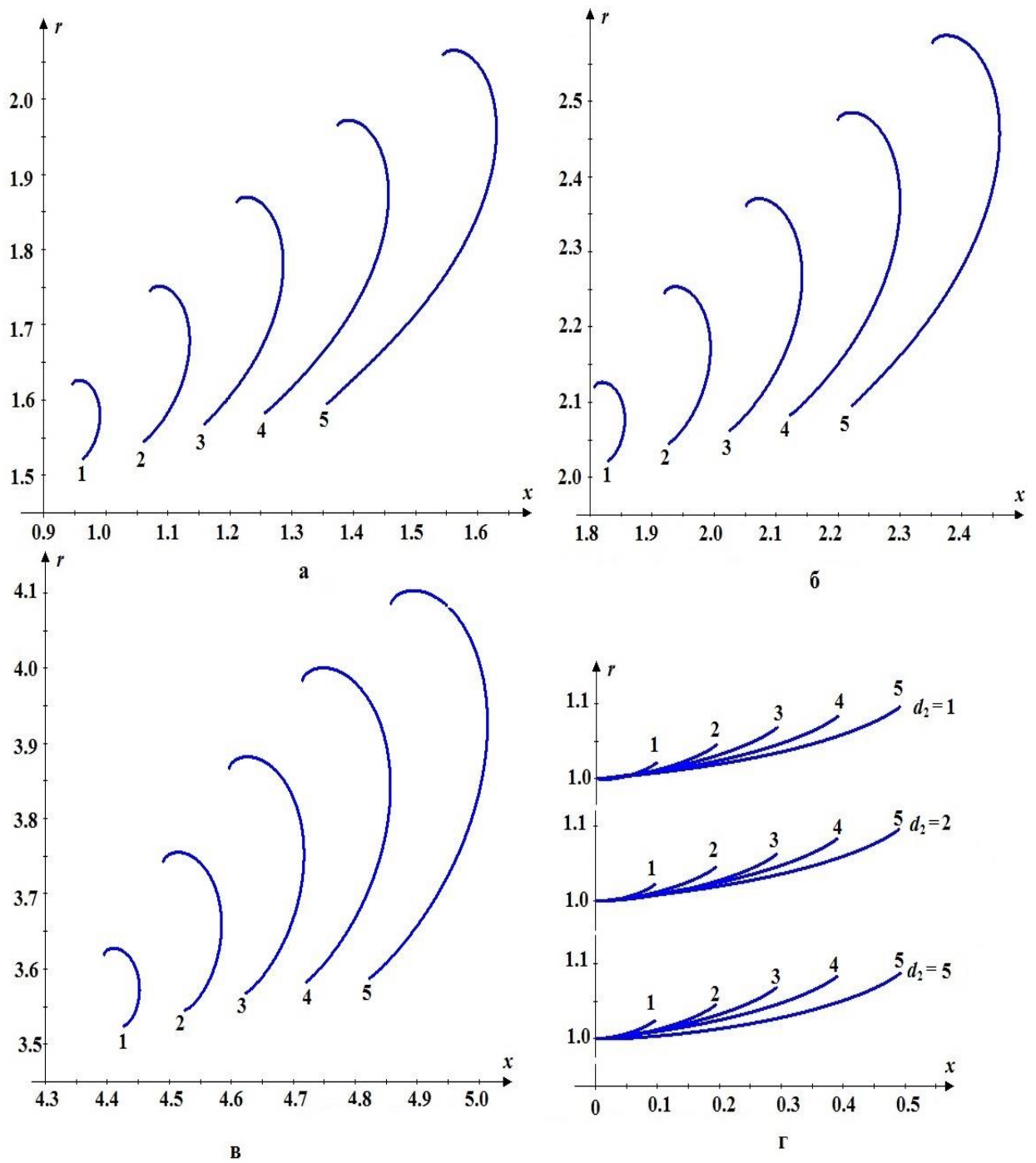


Рисунок 4.4 - Кривые профилирования для $\beta = 30^\circ$
 (1 – $d_1 = d_3 = 0,1$, 2 – $d_1 = d_3 = 0,2$, 3 – $d_1 = d_3 = 0,3$,
 4 – $d_1 = d_3 = 0,4$, 5 – $d_1 = d_3 = 0,5$) для первой ВЗ:
 а – $d_2 = 1$; б – $d_2 = 2$; в – $d_2 = 5$ и г – для второй ВЗ

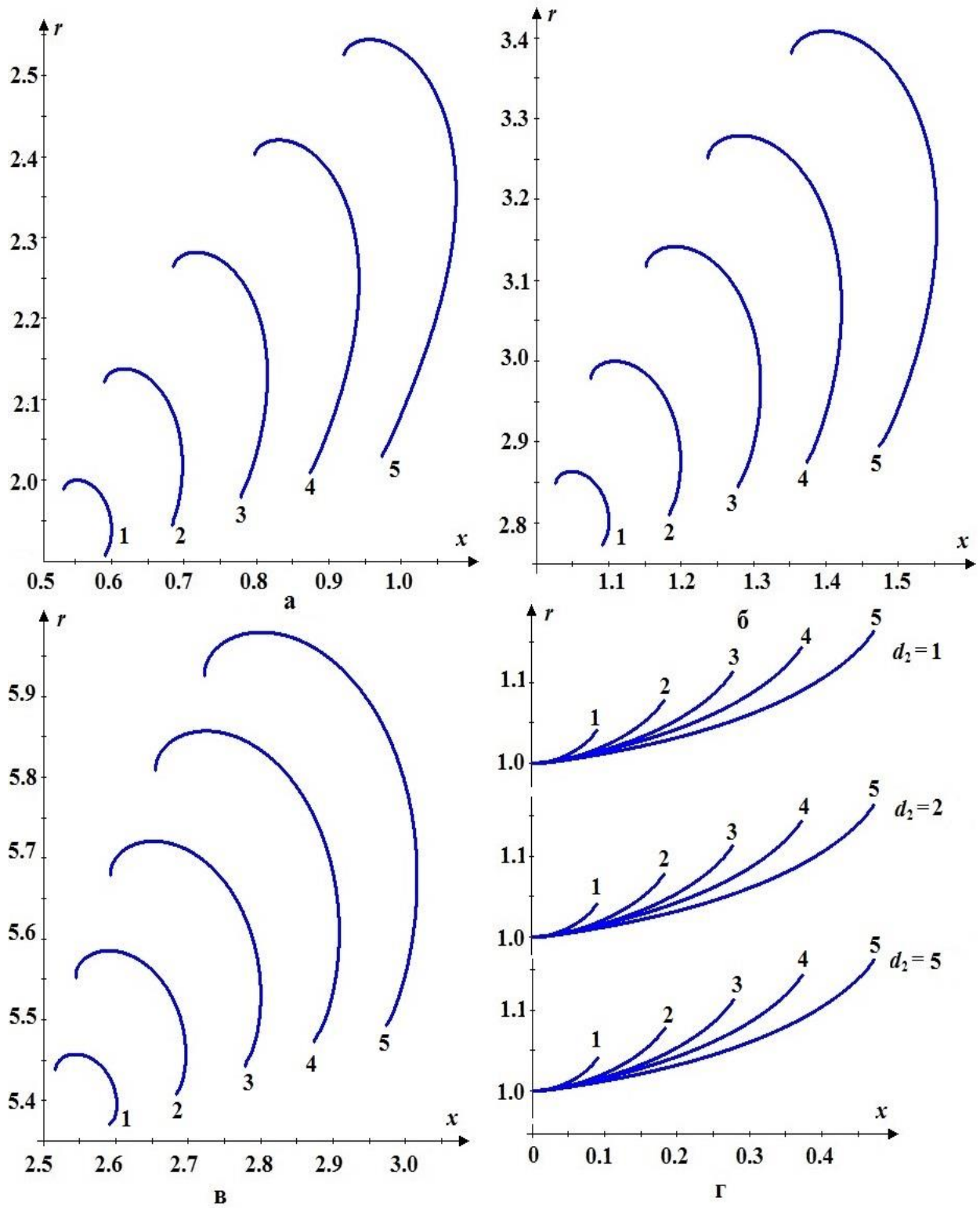


Рисунок 4.5 - Кривые профилирования для $\beta = 60^\circ$

(1 – $d_1 = d_3 = 0,1$, 2 – $d_1 = d_3 = 0,2$, 3 – $d_1 = d_3 = 0,3$, 4 – $d_1 = d_3 = 0,4$,
5 – $d_1 = d_3 = 0,5$) для первой ВЗ:

а – $d_2 = 1$; б – $d_2 = 2$; в – $d_2 = 5$ и г – для второй ВЗ

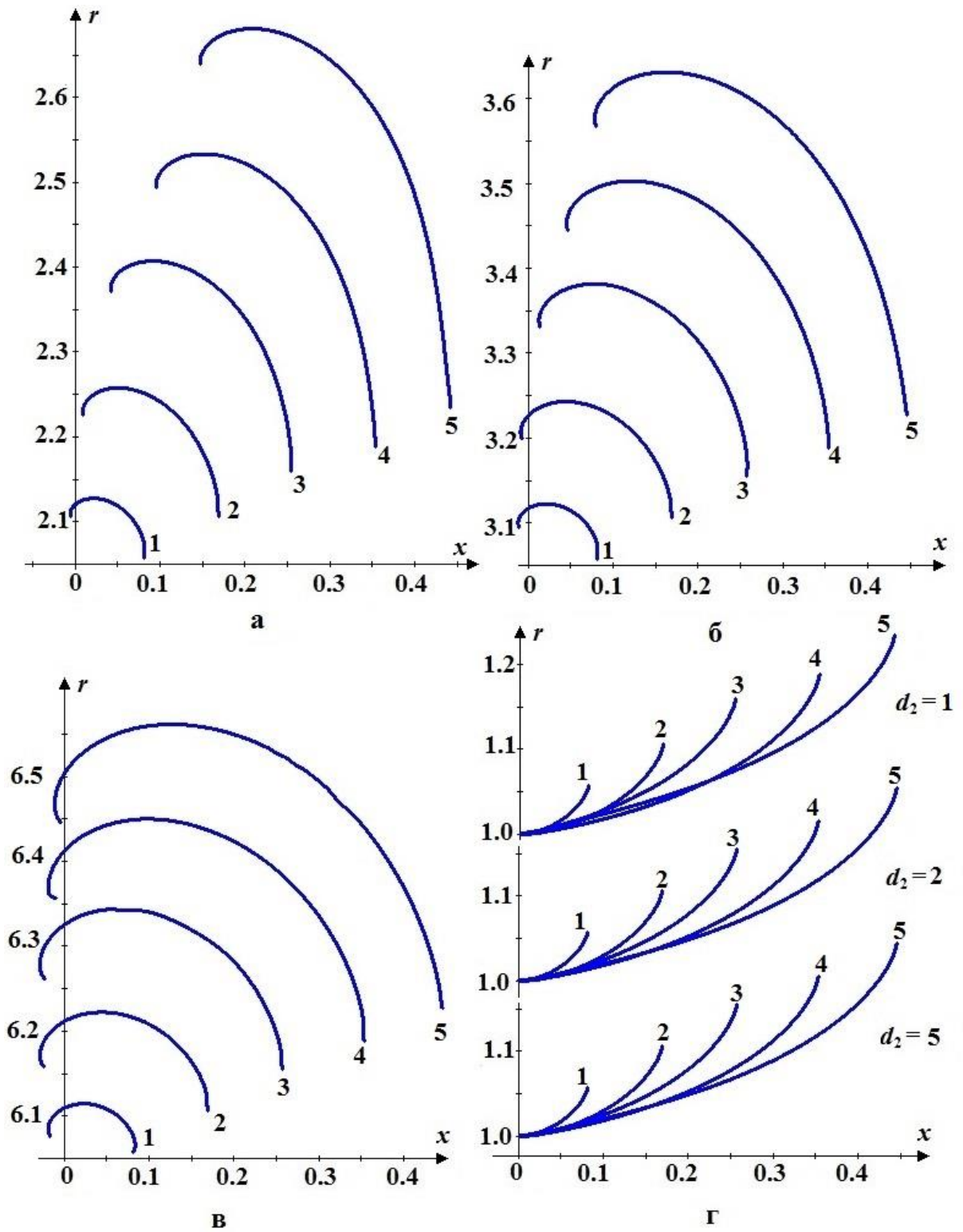


Рисунок 4.6 - Кривые профилирования для $\beta = 90^\circ$ (1 – $d_1 = d_3 = 0,1$, 2 – $d_1 = d_3 = 0,2$, 3 – $d_1 = d_3 = 0,3$, 4 – $d_1 = d_3 = 0,4$, 5 – $d_1 = d_3 = 0,5$)

для первой ВЗ:

а – $d_2 = 1$; б – $d_2 = 2$; в – $d_2 = 5$ и г – для второй ВЗ

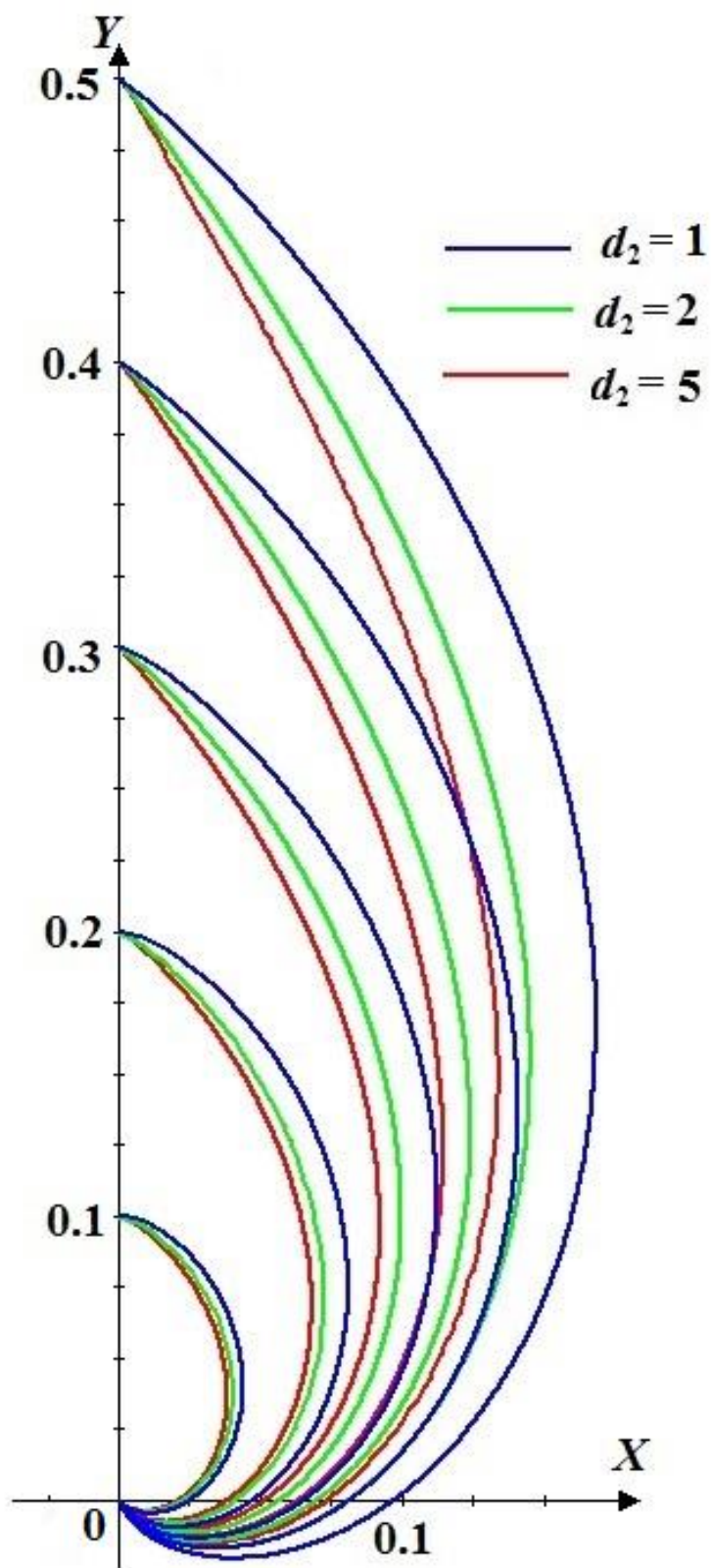


Рисунок 4.7 - Границы первой вихревой зоны
при разных длинах $d_1 = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5$ и $d_2 = 1, 2, 5$

Таблица 4.1 - Приближенные зависимости $y(x)$ для границ второй вихревой зоны

d_3	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0.1	$2,4571178x^2 + 0,0111441x + 1$	$5,4919113x^2 - 0,0564754x + 1$	$10,3056914x^2 - 0,1440469x + 1$
0.2	$1,136856x^2 + 0,0093144x + 1$	$2,4289744x^2 - 0,0226766x + 1$	$4,3264537x^2 - 0,1089646x + 1$
0.3	$0,6362546x^2 + 0,0449499x + 1$	$1,4169527x^2 + 0,0098725x + 1$	$2,4510819x^2 - 0,0297184x + 1$
0.4	$0,4491873x^2 + 0,0368576x + 1$	$0,9729709x^2 + 0,0205373x + 1$	$1,6321142x^2 - 0,0447182x + 1$
0.5	$0,3883692x^2 - 0,0149535x + 1$	$0,7278173x^2 + 9,4067734 \cdot 10^{-4}x + 1$	$1,1598034x^2 - 0,0071526x + 1$

Дальнейшее направление исследований предполагало решение данной задачи с учетом вязкости. Необходимо оценить влияние инерционности потока на размеры образующихся вихревых зон. Для этого представляет интерес установить влияние скорости всасывания на размеры вихревых зон. В дальнейшем нужно определить КМС отсосов с найденными длинами и углами полок, как не профилированных, так и профилированных по найденным границам.

4.2 Численное моделирование в комплексе SolidWorks

4.2.1 Поиск минимума КМС методом покоординатного спуска

Коэффициент местного сопротивления (КМС) является функцией углов наклона полок раструба, их длин и поперечного размера канала l (радиуса R для круглого и полуширины B):

$$\zeta = f(\alpha, \beta, \gamma, d_1, d_2, d_3, l). \quad (4.2)$$

Угол наклона второй полки β постоянен и равен 90° поскольку это способствует увеличению дальности захвата отсоса. Для уменьшения количества переменных длины полок отнесем к линейному масштабу l ,

равному радиусу R канала для круглого отсоса и полуширине канала B для щелевого отсоса. Поэтому задача сводится к определению минимума функции 5-ти переменных:

$$\zeta = f(\alpha, \beta, \gamma, d_1/l, d_2/l, d_3/l). \quad (4.3)$$

Для поиска минимума применяется один из методов многомерной оптимизации [150] – метод покоординатного спуска. Величины КМС определялись численно в программном комплексе *SolidWorks* для круглых и щелевых отсосов – раструбов с тремя полками и при помощи натурального эксперимента для щелевого отсоса – раструба с тремя полками. Сначала фиксируется четыре переменные и изменяется одна переменная, определяется такая ее величина, при которой КМС принимает минимальное значение. Далее при найденном значении переменной изменяется другая величина, все остальные переменные фиксируются. После определения величины второй переменной, при которой КМС минимален переходим к поиску минимума при найденных значениях двух переменных, изменении третьей переменной и двух оставшихся переменных, зафиксированных в первоначальных значениях. Таким образом процесс продолжается пока не будут найдены значения всех переменных, при которых КМС минимален. Заметим, что в случае, когда КМС не имеет минимума при изменении переменной, ее значение определяется из величины скорости его падения, либо из конструктивных соображений.

4.2.2 Поиск оптимальной по величине КМС конструкции отсоса

Далее при изложении результатов расчета все размеры полок отнесены к радиусу R для круглых отсосов и полуширине $B = R = 0.1$ м – для щелевых и при обозначении длины полок это уже не указывается. Начальное значение для длин полок $d_1 = d_2 = d_3 = 1$. Угол $\alpha = 90^\circ$.

Из соображений удобства проведения опытов, порядок подбора параметров был следующий: $\gamma, d_3, d_2, \alpha, d_1$. При постоянном значении

указанных параметров и изменении угла наклона γ от 0 до 75° минимальное значение КМС (рисунок 4.8) достигается при $\gamma = 30^\circ$ и равняется 0.146. Расчетное значение КМС для круглого и щелевого отсосов достигает своего минимального значения (рисунок 4.8) также при $\gamma = 30^\circ$.

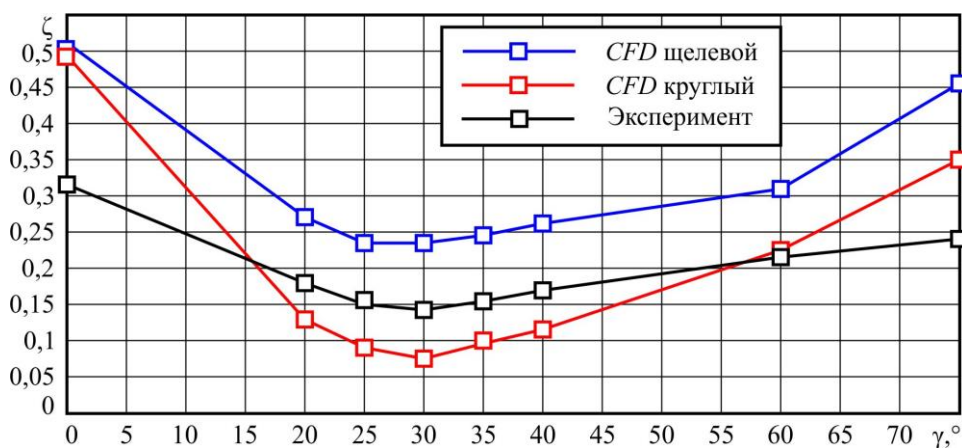


Рисунок 4.8 - График изменения значения ζ от угла наклона γ полки d_1

Далее величина угла $\gamma = 30^\circ$ фиксировалась и изменялась длина полки d_3 (рисунок 4.9). Все остальные параметры оставались прежними. Длина полки d_3 варьируются от 0 до 2 калибров. Здесь также была проведена проверка воспроизводимости результатов опытов по определению КМС. Проведена серия одних и тех же экспериментов ($n = 6$) по определению КМС для 6 длин $d_3 = 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2$ калибров ($k = 6$). 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.

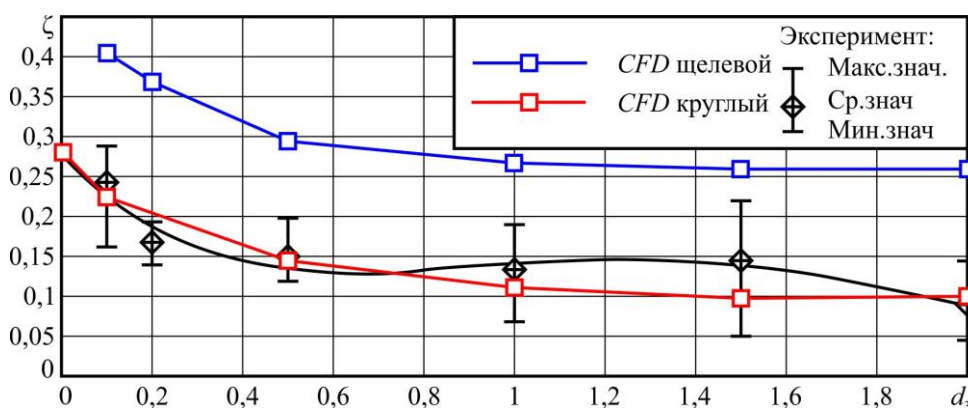


Рисунок 4.9 - График изменения значения ζ от длины полки d_3 при $\gamma = 30^\circ$

Полученные экспериментальные значения КМС были аппроксимированы при помощи метода наименьших квадратов следующим уравнением:

$$\zeta = 0,28058 - 0,61502d_1 / R + 0,853765(d_1 / R)^2 - 0,460311(d_1 / R)^3 + 0,08161(d_1 / R)^4. \quad (4.4)$$

На рисунке 4.10 график этой линии изображен черным цветом. Расчет и эксперимент показывают, что величина $d_3/R = 0,5$ является приемлемым значением для поиска минимального значения КМС. Дальнейшее ее увеличение не приводит к существенному падению КМС и может способствовать к падению скорости захвата отсосом.

При фиксированном значении $\gamma = 30^\circ$, $d_3/R = 0,5$, $d_1/R = 1$, угла наклона $\alpha = 90^\circ$ при изменении d_2 (рисунок 4.10) согласно экспериментальным данным величина КМС имеет минимум при $d_2/R = 0,7$. Похожие результаты показывают и численные расчеты. При $d_2/R > 0,7$ КМС практически не изменяется.

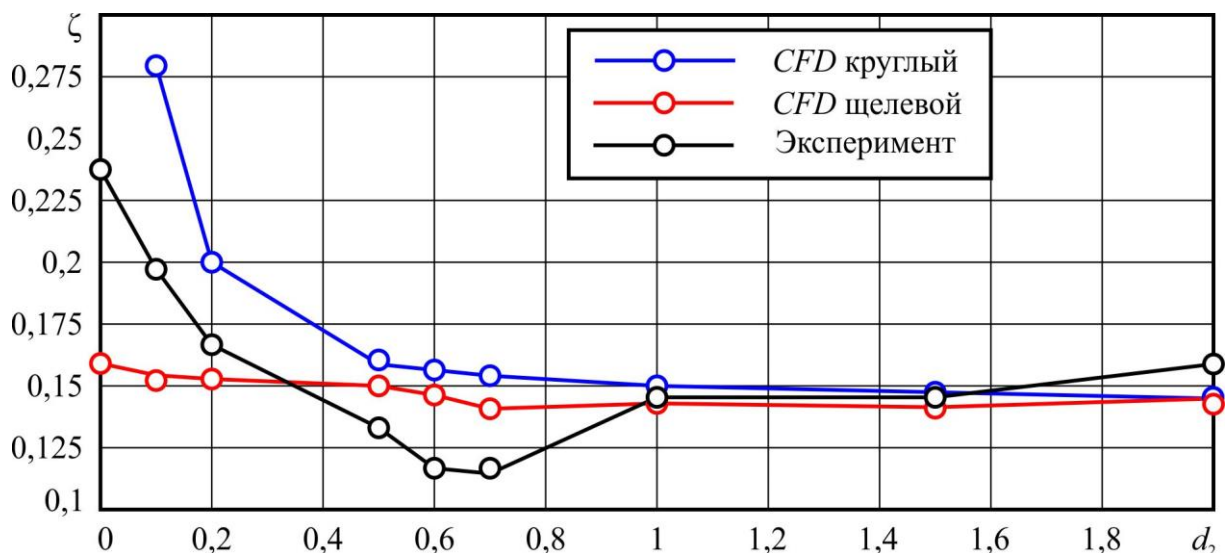


Рисунок 4.10 - График изменения значения ζ от угла наклона α для полки d_2

Далее при исследовании влияния угла наклона α фиксировались следующие найденные параметры: $d_3/R=0,5$; $\alpha=30^\circ$; $d_2/R = 0,7$; $d_1/R = 1$, а значения угла изменялись в диапазоне от 0 до 180° . Минимальное значение КМС, как в численных, так и в лабораторном эксперименте, найдено при $\alpha = 120^\circ$ (рисунок 4.11).

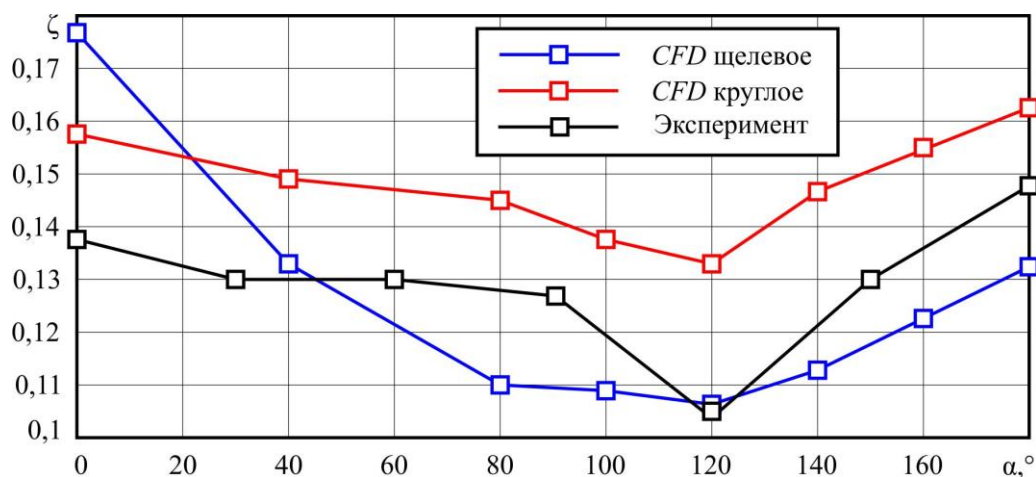


Рисунок 4.11 - График изменения значения ζ от угла наклона α для полки d_1

Последний этап, определение длины d_1 (рисунок 4.12), при найденных размерах конструкции: $d_3 = 0,5$; $\gamma = 30^\circ$; $d_2 = 0,7$; $\alpha = 120^\circ$. Результаты вычислительного и натурного экспериментов согласуются качественно. Для всех случаев, при $d_1/R > 0,2$ коэффициент ζ перестает быть зависимым от длины d_1 . Согласно натурному эксперименту наименьшее значение КМС $\zeta = 0,088$, по результатам численного расчета для круглого отсоса-раструба стремя полками: $\zeta = 0,128$, а для щелевого – $\zeta = 0,145$.

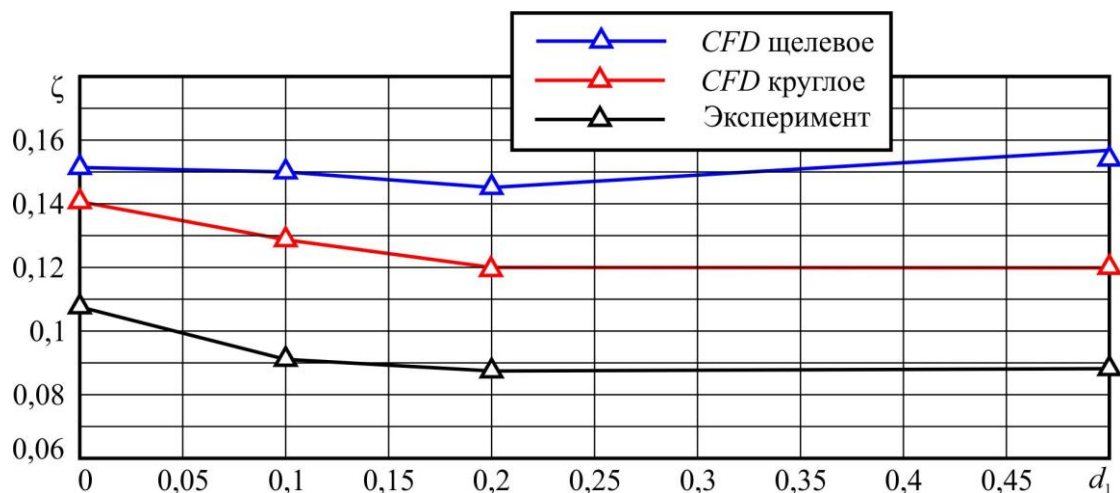


Рисунок 4.12 - График изменения значения ζ от длины полки d_1

Таким образом, с помощью метода покоординатного спуска получена конструкция отсоса-раструба со сниженным аэродинамическим сопротивлением при $d_1 = 0,5$; $\alpha = 30^\circ$; $d_2 = 0,7$; $\gamma = 120^\circ$; $d_3 = 0,2$.

С целью установления зависимости КМС отсоса-раструба от гидравлического режима течения было произведено параметрическое моделирование найденного конструктивного исполнения отсоса-раструба в среде *SolidWorks* (рисунок 4.13). В диапазоне чисел Рейнольдса $13 \cdot 10^5 < Re < 32 \cdot 10^5$ КМС слабо зависит от скорости потока воздуха, расхождение не превышает 0,2%.

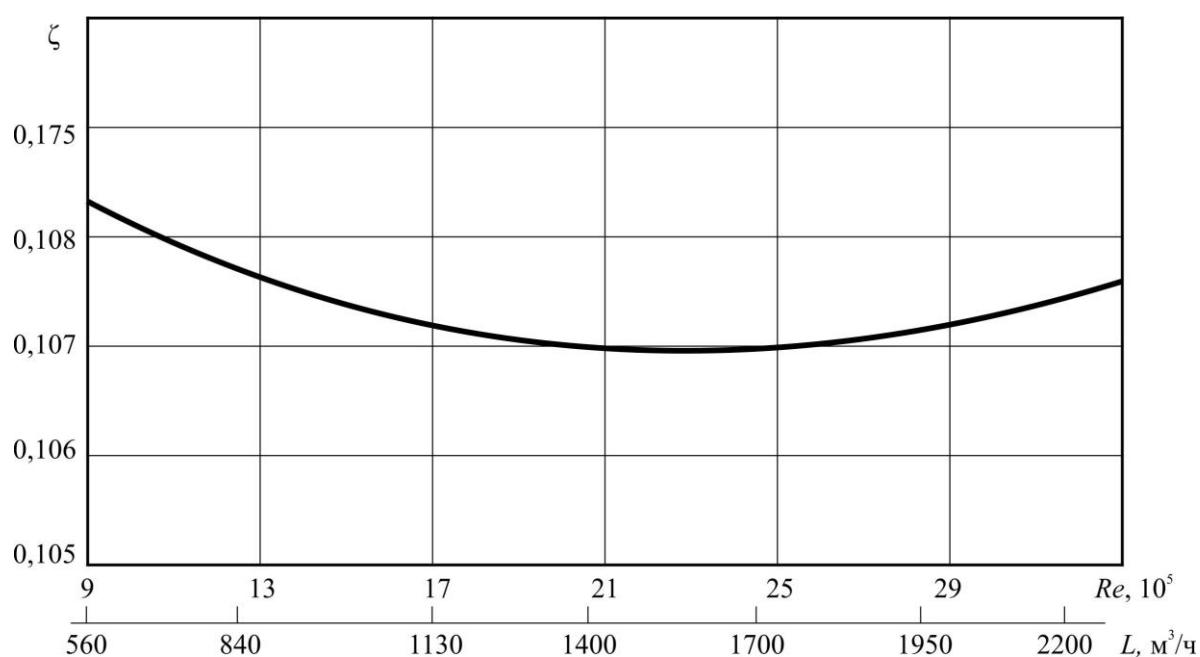


Рисунок 4.13 – Зависимость КМС отсоса-раструба от гидравлического режима течения

4.3 Распределение скоростей вблизи отсоса

Для выявления эффективности захвата загрязняющих веществ круглым отсосом-раструбом с тремя полками были построены зависимости безразмерных величин горизонтальной и вертикальной (радиальной) составляющей скорости $\mathbf{v} = \{v_x, v_y\}$ (рисунок 4.14) в сравнении с отсосом-раструбом длиной $d = d_1 + d_2 + d_3 = 1.4$ и углом наклона 90° (далее будем называть такой отсос – 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 4.14, а). Для радиальной составляющей скорости v_y/v_0 (рисунок 4.14, 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 КМС снижается более чем в три раза.

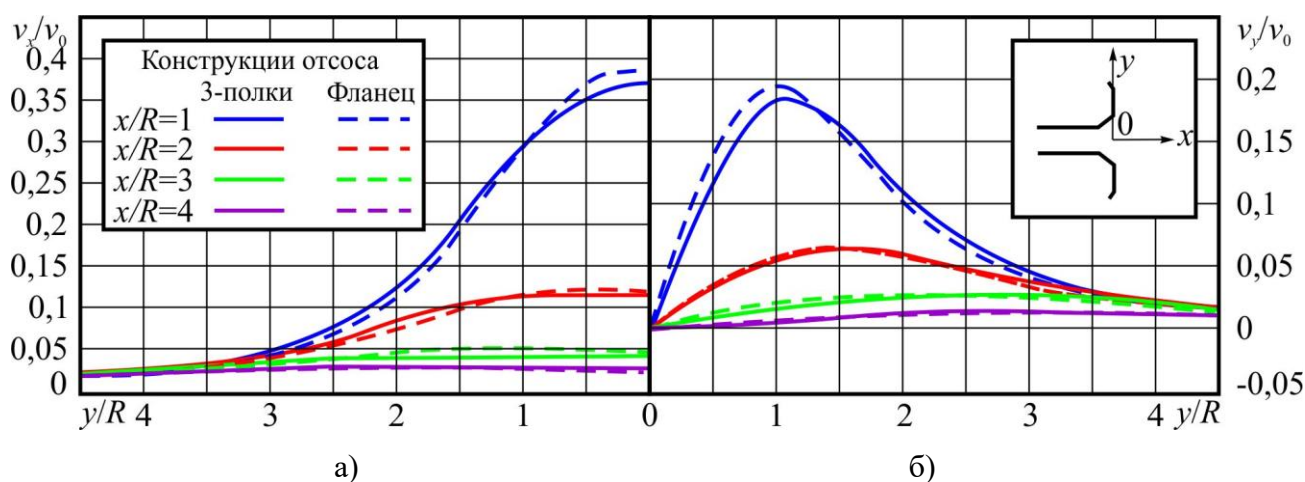


Рисунок 4.14 Профили осевой и радиальной составляющей скорости

На рисунке 4.15 представлены полученные размерные значения осевой скорости при подтекании к отсосам-раструбам с тремя полками и с фланцем, полученные численно методами *CFD* и при помощи эксперимента. Положительным направлением для осевой скорости считалось направление к всасывающему отверстию. Для численного эксперимента, во всасывающем сечении, вместо скорости задавалась величина статического давления, равная 101208 Па, такая же, как и в натурном эксперименте.

Наибольшая осевая (на оси x) 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 среде *Flow Simulation*, близки к экспериментальным данным. Для круглого отсоса осевая скорость изменяется аналогично. Таким образом, наличие такой конструкции из трех полок приводит к уменьшению отрыва потока при входе в отсос (вблизи полки d_3), что приводит к отсутствию заужения.

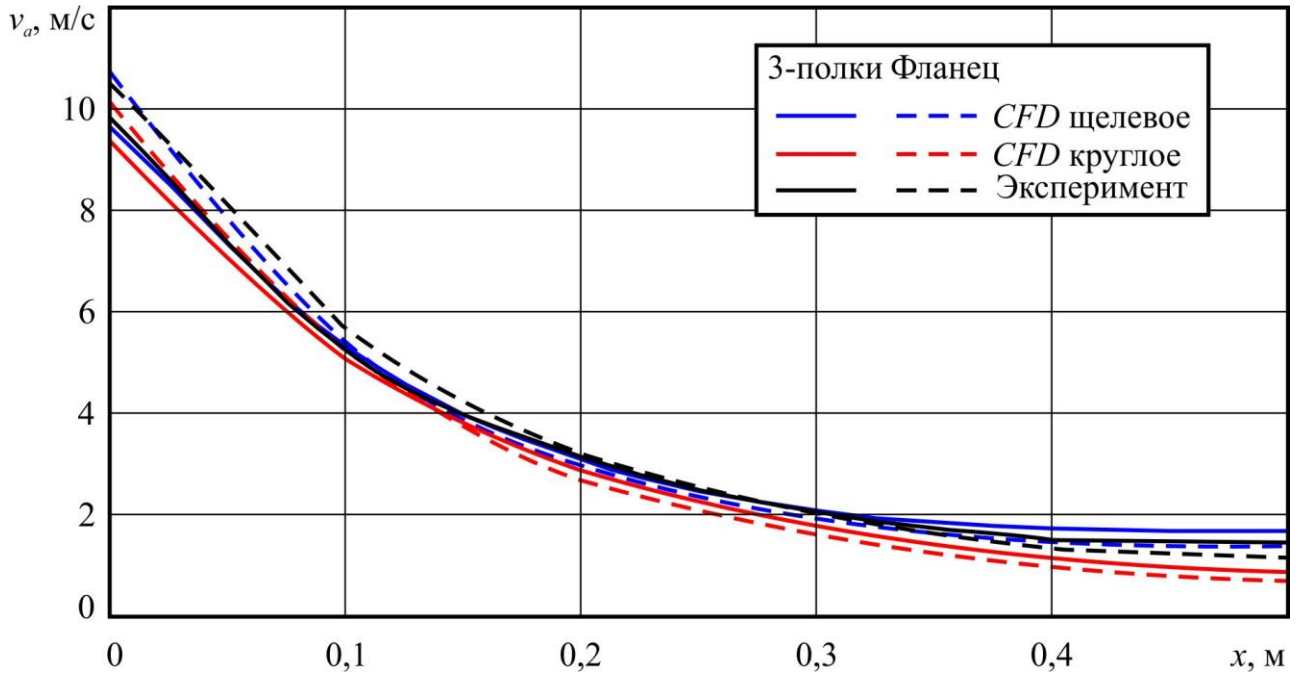


Рисунок 4.15 - Осевая скорость при подтекании воздуха к отсоса-раструбу

Найденное распределение скорости воздуха в зависимости от вида конструкции отсоса, будут полезными для выбора наиболее эффективного отсоса-раструба для улавливания загрязняющих веществ от конкретного источника их образования.

4.4 Очертания вихревых зон на входе в отсос

Численное и экспериментальное исследования очертаний вихревых зон проводятся для отсоса с тремя полками разработанной оптимальной конструкции (рисунок 4.16). Отрывные течения на входе во всасывающее отверстие разделяются на две зоны, визуально заметно, что первый отрыв происходит на кромке d_1 , и распространяется до середины полки d_2 , далее при

входе потока в канал, локализуется вторая вихревая зона по месту присоединения раструба к каналу с помощью третьей полки d_3 .

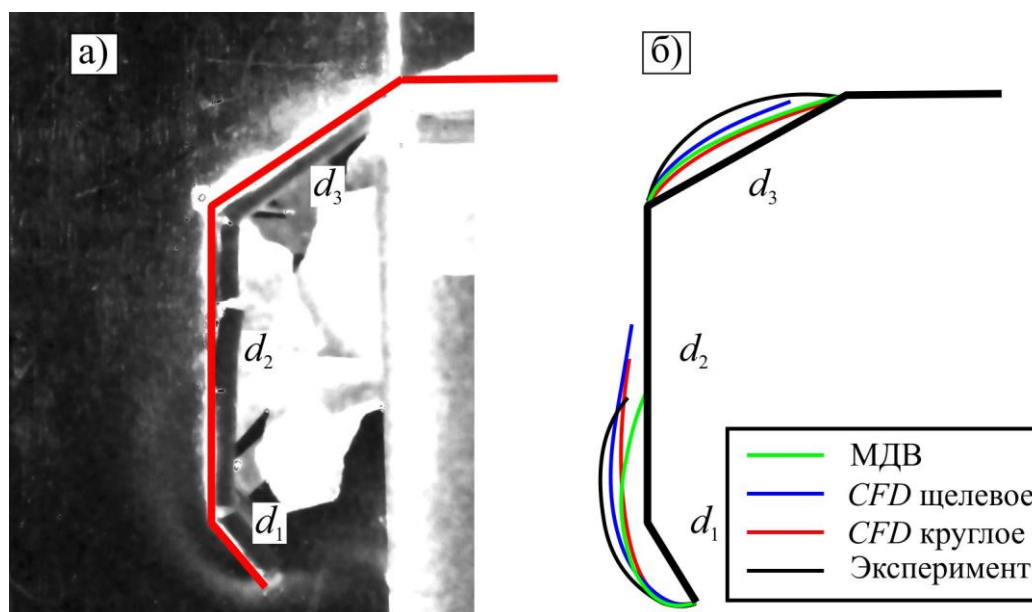


Рисунок 4.16 - Вихревые зоны на входе отсос-раструб с тремя полками

На рисунке 4.16 б представлены сравнения границы вихревых зон, полученных при помощи эксперимента, с численными расчетами, выполненными при помощи метода дискретных вихрей и при помощи метода *CFD* для круглой и щелевой конструкций раструба. Отметим, что границы вихревых зон, полученных методом *CFD* и дискретных вихрей близки между собой. Вторая вихревая зона 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_1 можно добиться, чтобы вихревая зона полностью прилегала к этой полке, но как показал эксперимент, значение КМС перестает уменьшаться, начиная с $d_1 = 0.2$, поэтому дальнейшее увеличение длины полки нецелесообразно. Очевидно, это связано с малыми скоростями воздушного течения вблизи полки d_1 , поэтому главное влияние на КМС оказывает вторая вихревая зона, которая локализована вблизи полки d_3 , где скорость воздуха значительно выше.

4.5 Выводы по четвертой главе

1. По разработанному вычислительному алгоритму рассчитаны размеры отсоса-раструба, состоящего из трех полок. При данных размерах образуются две вихревые зоны с длинами равными длинам, прилегающим к ним полкам. Границы вихревых зон 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 вихревым зон позволит исключить вихреобразование, снизить КМС входа в раструб и повторный вынос уловленных загрязняющих веществ, циркулирующих в этих вихревых зонах.

2. В программном комплексе *Solidworks*, в модуле *Flow Simulation* (*FloEFD*) разработана компьютерная модель вязкого отрывного течения при входе в щелевой и круглый отсос-раструб с тремя полками. По величине коэффициента местного сопротивления (КМС) доказана сеточная сходимость данной модели. Для щелевого отсоса-раструба с тремя полками создана лабораторная установка для исследования распределения скоростей воздушного потока и определения КМС. Численно и 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 их наклона 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: $\zeta = 0,120$, а для щелевого – $\zeta = 0,145$.

3. 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.

4. Очертания вихревых зон определены экспериментально и численно. При этом дополнительно использовался метод дискретных вихрей – 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, образуемая с острой кромки d_1 , не полностью локализуется вблизи этой полки, но оказывает не столь существенное влияние на КМС.

5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ОТСОСА-РАСТРУБА

Для подтверждения численных и экспериментальных исследований, проведены натурные испытания в Якутском котловом заводе, где сравнивались потери давления в системе вентиляции для сварочного поста и величины относительного модуля скорости на разном удалении от отсоса.

5.1 Промышленный эксперимент в ООО «Якутский котловой завод»

Компания ООО «Якутский котловой завод» начала свою деятельность с 2013 г. на территории Республики Саха (Якутия). Завод производит запатентованные твердотопливные котлы длительного горения (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 - Фото общего вида здания

Улучшение условий труда в сварочном производстве является серьезным фактором сохранения здоровья рабочих и повышения производительности труда. Выделяющимися вредностями являются сварочные аэрозоли и пыль от металлической резки от технологических оборудования.

Сварочные процессы [151] отличаются интенсивным тепловыделением (лучистым и конвективным), пылевыведением токсичной мелкодисперсной пылью и газовыделением. Основными компонентами пыли при сварке и резке

сталей являются окислы железа, марганца и кремния, также другие соединения легирующих элементов.

5.2 Описание системы вытяжной вентиляции, приборная база

Натурные испытания проводились для системы вытяжной вентиляции стола сварки и резки металлов. Установка (рисунок 5.2) состоит радиального вентилятора ВР 80-75 4 с мощностью электродвигателя 1,5 кВт и частотой вращения 1295 об/мин (1), циклона ЦН-11-400П (2), круглого воздуховода диаметром 200 мм (3), и отсоса-раструба (5) присоединенного с помощью гибкого шланга диаметром 200 мм (4) к воздуховоду (3). Существующий отсос представляет собой скошенный раструб с углом раскрытия 30° (рис.5.2 д, рис. 5.3). Разработанный отсос –раструб (рис. 5.4 - 5.5) изготовлен при помощи 3-D печати с размерами, полученными в предыдущей главе. Замеры полного и динамического давления производились в точках I и II, с помощью пневмометрической трубки и дифференциального манометра *Testo-510*. По мере удаления от отсоса измерялись величины скорости воздушного потока с помощью термоанемометра АТЕ-1034. Точки измерений скорости в поперечном сечении располагались в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 [149]. Всего в сечении воздуховода использовалось четыре точки измерений (рисунок 5.2, б).

В процессе визуально-инструментального обследования использовались приборы, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Измеряемые величины и приборы

№, п/п	Измеряемый параметр	СИ	Наименование прибора
1.	Температура	°С	АТЕ-1034
2.	Скорость воздуха	м/с	АТЕ-1034
3.	Статистическое давление	Па	<i>Testo 510</i>
4.	Динамическое давление	Па	<i>Testo 510</i>

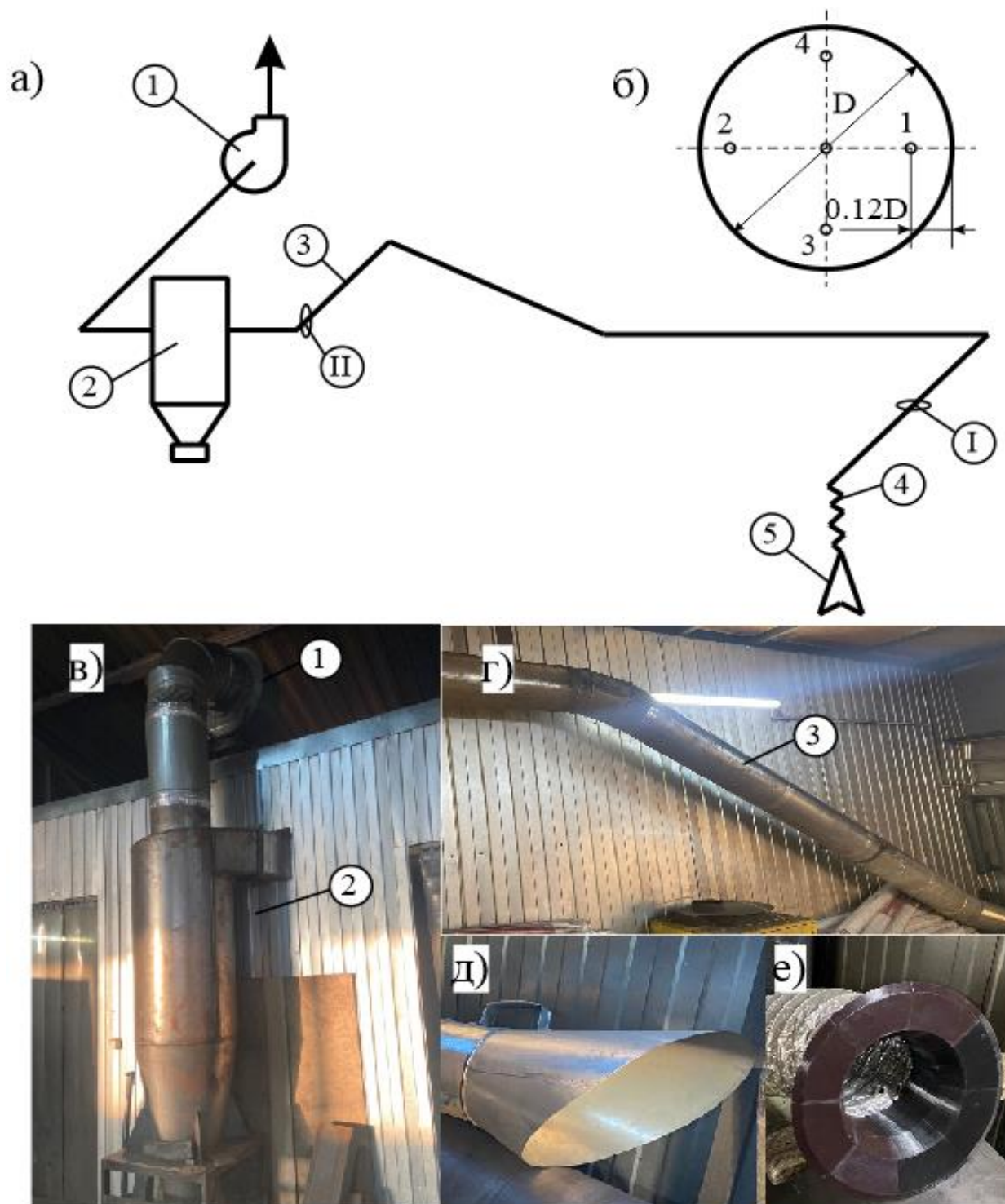


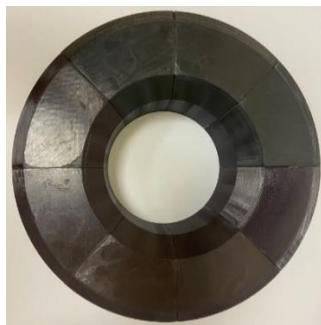
Рисунок 5.2 – Система вытяжной вентиляции для стола сварки и резки металла: а) схема; б) точки замера в сечении давлений и скорости; в) фото вентилятора и циклона; г) фото воздуховода; д) фото отсоса-раструба углом наклона 30 градусов; е) фото отсоса-раструба с тремя полками (1 – вентилятор; 2 – циклон; 3- воздуховода; 4 – гибкий воздуховод; 5 – отсос-раструб)



Рисунок 5.3 – Существующий отсос-раструб



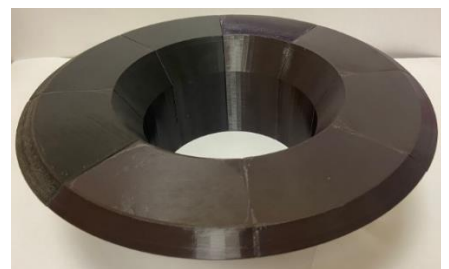
Рисунок 5.4 – Предлагаемый отсос-раструб с тремя полками



а)



б)



в)

Рисунок 5.5 – Зонт отсоса-раструба с тремя полками: а – вид сверху, б – вид сбоку, в – изометрический вид

Характеристики основных измерительных приборов указаны ниже:

Портативный термоанемометр с возможностью температурных измерений, работает по принципу охлаждения воздушным потоком нагретой

нити. Анемометр с выносным телескопическим датчиком (280...940 мм, диаметр 12 мм) необходим для измерения скорости потока воздуха 0,2-25 м/с и температуры 0...50 °С. Измерение температуры осуществлялось при помощи термопар *K* и *J* типа: -100...1300 °С. Интерфейс RS232 имеет возможность подключения к ПК через порт *USB* с помощью преобразователя интерфейса АКТАКОМ *ACE-1025* и широкой программной обработкой данных с помощью программ *ADLM-W* или *ADLM-A* с использованием ОС *Windows* или *Android* соответственно. Основные характеристики прибора представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Характеристики прибора АТЕ-1034

Характеристики АТЕ-1034	Значения
Диапазон измерений: - скорость потока, - температура воздушного потока, - температура при помощи термопар,	0,2 до 25,0 м/с 0 до +50 °С -100 до +1300°С
Погрешность: - скорость потока, - температура	±(0,1 м/с + 5% от изм. знач.) (0 до +2 м/с) ±(0,3 м/с+ 5% от изм. знач.) (в ост. диапазоне) ±0,5 °С
Разрешение: - скорость потока, - температура	0,01 м/с 0,1 °С
Рабочая температура:	от 0 до +50 °С
Температура хранения:	от -20 до +70 °С

Дифференциальный манометр *Testo 510* измеряет дифференциальное давление в диапазоне от 0 до 100 гПа. Измерение дифференциального давления осуществляется с температурной компенсацией для более точных результатов. В сочетании с трубкой Пито *Testo 510* может измерять скорость потока воздуха. Компенсация плотности воздуха позволяет получить более точные результаты измерений. Основные характеристики прибора представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Характеристики дифференциального манометра Testo 510

Размеры	119 x 46 x 25 мм
Рабочая температура	0 ... +50 °C
Класс защиты	IP40
Выборочные модули	гПа, мбар, Па, мм вод.ст., дюйм вод.ст., дюйм рт.ст., мм рт.ст., psi, м/с, всп/мин
Макс. статическое давление	500 мбар
Частота измерений	0,5 с.
Тип батареи	2 микроэлемента AAA
Ресурс батареи	50 ч (в среднем, без подсветки дисплея)
Температура хранения	-40 ... +70 °C
Вес	90 г (с батарейками и защит. крышкой)

5.3 Результаты замеров и обсуждение

Результаты замеров скорости воздушного потока, давления и расчет КМС приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Результаты замеров и расчета

№	Условия	v , м/с	$P_{\text{дин}}^I$, Па	$P_{\text{п}}^I$, Па	$P_{\text{дин}}^{II}$, Па	$P_{\text{п}}^{II}$, Па	L , м ³ /ч	ζ
1	Круглый отсос с углом наклона 30 градусов	6,8	27,9	6,8	47,0	92,0	768,7	0,243
2	Круглый отсос с тремя полками	6,9	28,8	3,0	45,3	72,7	779,9	0,104

Как видно из таблицы 5.5, при использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками потери давления в канале снижаются на 21%, в точке I, после отсоса-раструба в гибком воздуховоде в точке II снижается на 55%, скорость воздуха в канале повышается на 0.1 м/с, расход воздуха увеличилось на 1,5%, коэффициент местного сопротивления удалось снизить на 65%.

Замеры осевой скорости воздушного потока производилось при удалении от входа в раструб (рисунок 5.6).

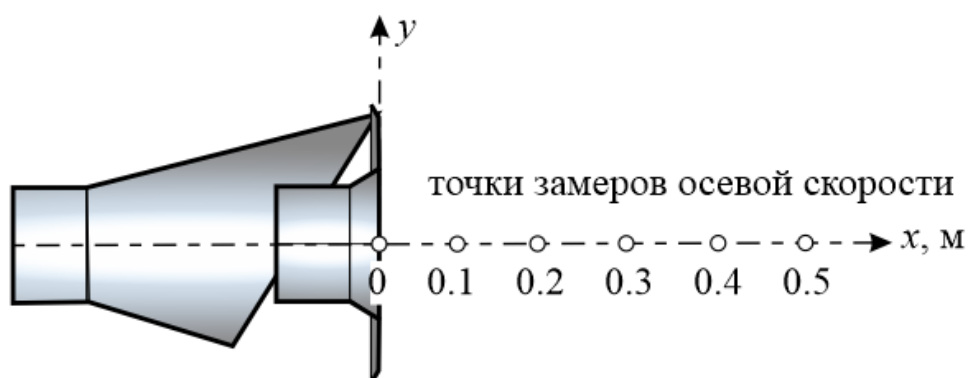


Рисунок 5.6 – Схема замеров осевой скорости на входе существующего отсоса-раструба

Наибольшая осевая составляющая скорости v_a (рисунок 5.7) достигается у круглого отсоса-раструба с тремя полками на близких расстояниях при $x < 0,2$, далее величины скорости приблизительно равны.

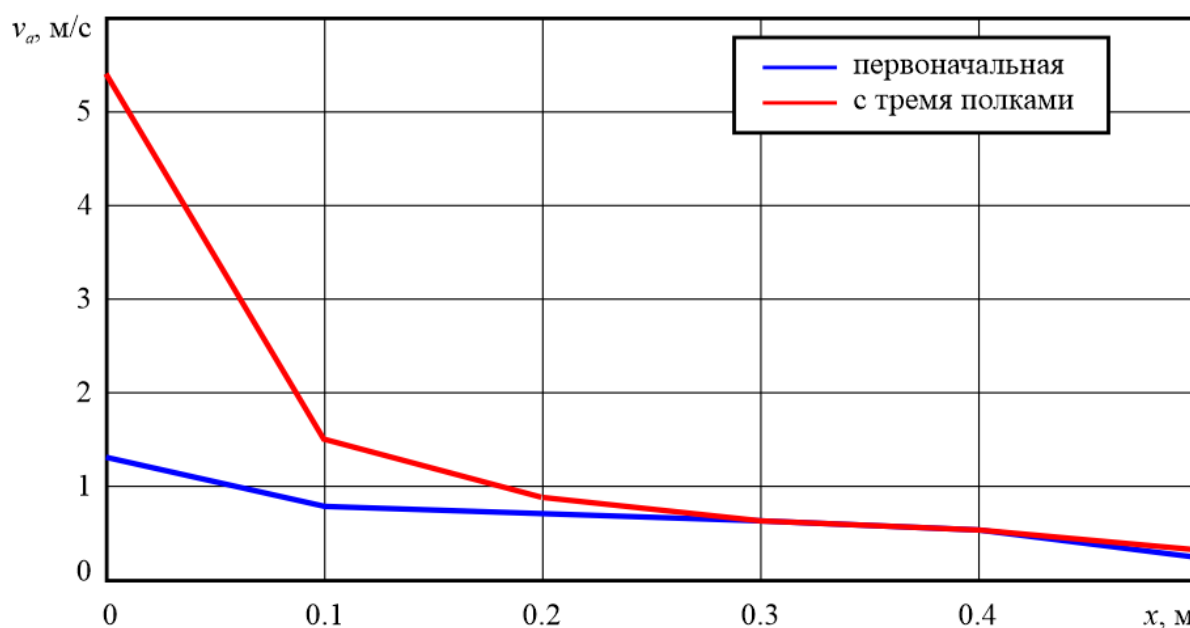


Рисунок 5.7 - Сравнение осевой скорости

5.4 Технико-экономическое обоснование

Экономический эффект применения круглого отсоса-раструба с тремя полками для системы местной вытяжной вентиляции для стола сварки и резки металлов оценивается снижением затрат на потребности энергоресурсов (электроэнергии) [152].

Потери давления в существующей сети составляют $P_{\text{сущ}}$ - 624,89 Па

С применением отсоса-раструба с тремя полками составляет $P_{\text{отс}} = 588,68$ Па

Потери давления снижены на:

$$\Delta P = P_{\text{суц}} - P_{\text{отс}} = 30,9 \text{ Па}$$

Количество сэкономленной электроэнергии составляет:

$$\Delta N = N_1 - N_2 = 2118 - 2043 = 75,51 \text{ Вт}$$

За год работы системы количество сэкономленной энергии составит

$$\Delta E = 75,51 \times 247 \times 12 / 1000 = 223,81 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Чтобы рассчитать показатель экономии $\Delta \mathcal{E}$ необходимо знать тариф энергии на 1 кВт·ч в городе Якутске за 1 квартал 2024 года. $T = 9,22$ руб/кВт·ч.

$$\mathcal{E} = 9,22 \times 223,81 = \mathbf{2063,57 \text{ рублей}}$$

Социально экономический эффект [153] от применения круглого отсоса-раструба с тремя полками для системы местной вытяжной вентиляции для стола сварки и резки металлов оценивается:

- повышением продуктивности труда и, как следствие, повышение эффекта от деятельности персонала;
- снижение затрат на подготовку кадров ввиду сокращения их текучести;
- снижение затрат на медицинское обслуживание персонала.

Эффект от повышения продуктивности труда может быть оценен следующим образом:

$$\mathcal{E}_1 = P \cdot \Delta B \cdot C_{\text{пр}} \cdot (1 - \omega) \cdot \alpha. \quad (5.1)$$

где, P – рентабельность хозяйственной деятельности; $C_{\text{пр}}$ – годовая производственная программа, тыс. руб.; α – доля времени работы системы вентиляции в году; ΔB – повышение производительности персонала в связи с

применением системы вентиляции (%); ω – вероятность отказов в работе системы вентиляции.

Эффект от снижения затрат на подготовку кадров ввиду сокращения их текучести может быть оценен следующим образом:

$$\Theta_2 = \left(1 - \frac{KT_{\text{после}}}{KT_{\text{до}}}\right) \frac{P \cdot C_{\text{пр}}}{\beta \cdot 247} Y \cdot \rho \cdot (1 - \omega). \quad (5.2)$$

где, $KT_{\text{до}}$ – коэффициент текучести рабочей силы до осуществления мероприятий; $KT_{\text{после}}$ – коэффициент текучести рабочей силы после осуществления мероприятий; β – среднесписочное число сотрудников предприятия; Y – общая численность работников, уволившихся в течение года; ρ – средняя продолжительность периода приобретения вновь поступившим работником специальных навыков и необходимого опыта (рабочих дней); β – коэффициент, учитывающий снижение производительности труда вновь поступившего работника в период приобретения им специальных навыков и необходимого опыта.

Эффект от снижения затрат на медицинское обслуживание персонала может быть оценен как сумма экономии средств работодателя на оплату пособия по временной нетрудоспособности за первые три дня временной нетрудоспособности работника (начиная с четвертого дня временной нетрудоспособности пособие выплачивается за счет средств ФСС РФ), а также повышение эффекта от деятельности персонала за счет увеличения фонда рабочего времени следующим образом:

$$\Theta_3 = (3 \cdot B_{\text{пос}} \cdot \Delta B \cdot \beta \cdot C_{\text{пос}} + P \cdot C_{\text{пр}} \cdot \frac{B_{\text{год}} \cdot \Delta B \cdot \beta}{247}) \cdot (1 - \omega) \cdot \alpha. \quad (5.3)$$

где, $C_{\text{пос}}$ – средний размер выплат, приходящийся на один день временной нетрудоспособности; ΔB – процент сокращения заболеваемости работников в связи с применением системы кондиционирования и вентиляции; $B_{\text{год}}$ – среднее количество дней болезни за год, приходящееся на

одного человека; $B_{\text{пос}}$ – среднее количество пособий по временной нетрудоспособности за год, приходящееся на одного человека.

Расчет социально-экономического эффекта при использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками сведен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Социально-экономический эффект при использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками на заводе ООО «ЯКЗ»

Годовой эффект от повышения продуктивности труда $\mathcal{E}_1$	3648,00 руб.
Годовой эффект от снижения затрат на подготовку кадров ввиду сокращения их текучести $\mathcal{E}_2$	584,82 руб.
Годовой эффект от снижения затрат на медицинское обслуживание персонала $\mathcal{E}_3$	21505,82 руб.
Итого	25737,64 руб.

5.5 Выводы по пятой главе

1. Разработанное, на основе результатов численных и экспериментальных исследований, новое конструктивное решение местного отсоса-раструба с тремя полками, внедрено в Якутский котловой завод (ООО «ЯКЗ»). При применении круглого отсоса-раструба с тремя полками удалось снизить потери давления в сети на 20% и повысить скорость захвата загрязняющих веществ.

2. Выполнен технико-экономический расчет в случае применения круглого отсоса-раструба с тремя полками. Внедрение разработанного устройства выгоднее на 4% (экономии в год 2063,57 руб.), чем существующего отсоса. Снижение потребления электроэнергии - 223,81 кВт*ч.

3. Социально-экономический эффект при использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками на заводе ООО «ЯКЗ» в г. Якутске составляет 25737,64 рублей в год на каждый сварочный пост.

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 полок, 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 вихревым 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Huang, Y.* Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods / Yanqiu Huang, Yi Wang, Li Liu, Peter V. Nielsen, Rasmus L. Jensen, Xiaoni Yang // *Energy and Buildings*. - 2017. - Vol. 154. - P. 207-216. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.061
2. *Vekteris, V.* Investigation of the efficiency of the lateral exhaust hood enhanced by aeroacoustic air flow / V. Vekteris, I. Tetsman, V. Mokshin // *Process Saf. Environ. Prot.* - 2017. - Vol. 109. - P. 224--232. DOI: 10.1016/j.psep.2017.04.004
3. *Jeong, S.* A study on the improvement of ventilation rate using air-flow inducing local exhaust ventilation system / S. Jeong, S. H. Kwon, S. Ahn [et al.] // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. - 2016. - Vol. 15(1). - P. 119--126. DOI: <http://doi.org/10.3130/jaabe.15.119>
4. *Huang, Y.* Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant / Y. Huang, Y. Wang, L. Liu [et al.] // *Build. Environ.* -2015. - Vol. 85. - P. 94--103. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.038
5. *Flynn, M. R.* Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry - a literature review / M. R. Flynn // *Ann. Occup. Hyg.* - 2012. - Vol. 56, № 7. - P. 764--776. DOI: 10.1093/annhyg/mes018
6. *Shepherd, S.* Reducing Silica and Dust Exposures in Construction During Use of Powered Concrete-Cutting Hand Tools: Efficacy of Local Exhaust Ventilation on Hammer Drills / Shephred S., Woskie S.R., Holcroft C., Ellenbecker M. // *Journal of Occupational and Environmental hygiene*. - 2009. - №6 (1). - P.42-51. DOI: 10.1080/15459620802561471
7. *Ojimai, J.* Efficiency of a tool-mounted local exhaust ventilation system for controlling dust exposure during metal grinding operations / J. Ojimai // *Ind. Health*. - 2007. - Vol. 45 (6). - P. 817--819. DOI: 10.2486/indhealth.45.817

8. *Gonzalez, E.* Influence of exhaust hood geometry on the capture efficiency of lateral exhaust and push-pull ventilation systems in surface treatment tanks / E. Gonzalez, F. Marzal, A. Minana, M. Doval // *Environ. Prog.* - 2008. - Vol. 27, № 3. - P. 405--411. DOI: 10.1002/ep.10287

9. *Chern, M.J.* Numerical investigation push-pull and exhaust of turbulent diffusion in fume cupboards / M.J. Chern, W.Y. Cheng // *Ann. Occup. Hyg.* - 2007. - Vol. 51(6). - P. 517--531. DOI: 10.1093/annhyg/mem031

10. *Lim, K.* A numerical study on the characteristics of flow field, temperature and concentration distribution according to changing the shape of separation plate of kitchen hood system / K. Lim, C. Lee // *Energ. Buildings.* - 2008. - Vol. 40. - P. 175-184. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.02.028

11. *Soltanpour, Z.* Micronucleus assay of DNA damage among welders / Soltanpour Z., Rasoulzadeh Y., Ansarin K., Seyedrezazadeh E., Jafarpour M., Mohammadian Y., Khuniqui H.N. // *Effects of welding processes (2023) Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 887, art. no. 503598

12. *Ebrahimi, V.* Exposure assessment to BTEX in the air of nail salons in Tehran city / Ebrahimi V., Yarahmadi R., Salehi M., Ashtarinezhad A. // *Iran (2023) Heliyon*, 9 (7), art. no. e18195.

13. *Yanghao, Liu.* Reduced-scale experimental investigation on flow field characteristics of exhaust hood of double helix lifting transportation equipment in an industrial plant / Yanghao Liu, Lei Bao, Haozhe Wang, Anfeng Yu, Chuntao Ge. // *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 43, 2023, 102798, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102798>

14. *Zhao, X., Yin, Y.* Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend, *Building and Environment*, 251, 2024, art. no. 111229.

15. *Huang, Y.* Flow-field characteristics and ventilation performance of the high-temperature buoyant jet controlled by spray-local exhaust ventilation / Huang

Y., Guo S., Gao H., Wang Y., Li W., Zhang Y., Wang Z. // Building and Environment, 225, 2022. art. no. 109644. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109644

16. *Averkova, O.A.* Modeling detached flows at the inlet to round suction flues with annular screens (2014) / Averkova O.A., Logachev I.N., Logachev K.I., Khodakov I.V. // Refractories and Industrial Ceramics, 54 (5), 2014. pp. 425 – 429. DOI: 10.1007/s11148-014-9625-z

17. *Averkova, O.A.* Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters / Averkova O.A., Zorya V.Yu., Logachev I.N., Logachev K.I. // Refractories and Industrial Ceramics, 51 (3), 2010. pp. 177 – 182. DOI: 10.1007/s11148-010-9284-7

18. *Yin, Y.* Analysis and optimization of energy loss reduction in a modified tee with deflectors via energy dissipation and vortex strength / Yin Y., Li A., Li J., Wu D., Wang T., Ma Y., Che L. // Energy and Buildings, 290, 2023, art. no. 113094. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113094

19. *Yin, Y.* Low-resistance optimization and secondary flow analysis of elbows via a combination of orthogonal experiment design and simple comparison design / Yin Y., Li A., Wu D., Li J., Guo J. // Building and Environment, 236, 2023, art. no. 110263, DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110263

20. *Ovsyannikov, Y.G.* Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation / Ovsyannikov Y.G., Gol'Tsov A.B., Seminenko A.S., Logachev K.I., Uvarov V.A. // Refractories and Industrial Ceramics, 57 (5), 2017, pp. 557 – 561. DOI: 10.1007/s11148-017-0022-2

21. *Kang, J.H.* Effect of vanes on vortex characteristics of a vortex ventilation system / Kang J.H., Jung S.Y., Kim J.J. // Journal of Building Engineering, 76, 2023, art. no. 107160.

22. *Cao, Z.* Numerical study on the effect of buoyancy-driven pollution source on vortex ventilation performance / Cao Z., Bai Y., Wang Y., An Y., Zhang C., Zhao T., Zhai C., Lv W., Zhou Y., Wu S. // Building and Environment, 225, 2022, art. no. 109634. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109634

23. *Logachev, K.I.* Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation / Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G. // *Refractories and Industrial Ceramics*, 56 (6), 2016, pp. 679 – 683. DOI: 10.1007/s11148-016-9911-z

24. *Logachev, K.I.* Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood / Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol'tsov A.B // *Building and Environment*, 190, 2021, art. no. 107572. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107572

25. *Ziganshin A.M.* Minimizing local drag by shaping a flanged slotted hood along the boundaries of vortex zones occurring at inlet / Ziganshin A.M., Logachev K.I. // *Journal of Building Engineering*, 32, 2020, art. no. 101666. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101666

26. *Pinelli, M.* A numerical method for the efficient design of free opening hoods in industrial and domestic applications / M. Pinelli, A. Suman // *Energy*. - 2014. - Vol.74. - P. 484-493.

27. *Logachev, K. I.* A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova // *J. Build. Eng.* - 2020. - Vol.29 (2020), 101159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101159>

28. *Logachev, K. I.* On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova // *Build. Environ.* - 2019. - Vol. 151. - P. 338--347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.039>

29. *Аверкова, О. А.* Моделирование процессов обеспыливания технологического оборудования. Методы, алгоритмы, вычислительный и натурный эксперименты, практические рекомендации / О. А. Аверкова. — Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. — 365 с.

30. *Зиганшин А.М.* Совершенствование методов расчета и конструирования механических систем вентиляции сниженной энергоемкости

:дис. докт. техн. наук : 05.23.03 / Зиганшин Арслан Маликович ; ФГБОУ ВО "БГТУ им. В.Г. Шухова". — Белгород, 2020. — 420 с.

31. *Логачев А.К.* Совершенствование методов расчёта местных вентиляционных отсосов открытого типа: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Логачев Артур Константинович ; БГТУ им. В.Г. Шухова. — Белгород, 2018. — 231 с.

32. *Пузанок А.И.* Численное моделирование вихревых нестационарных пылегазовых течений в системах местной вытяжной вентиляции : автореферат. канд. техн. наук : 05.13.18 "математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" / Пузанок Алексей Иванович ; Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского. — Москва, 2006. — 22 с.

33. *Zhang, J.* Exhaust hood performance and its improvement technologies in industrial buildings: A literature review / Zhang J., Wang J., Gao J., Zhang W. // Building Simulation, 2023, DOI: 10.1007/s12273-023-1040-2

34. *Jia-Ning, Fan.* Droplet control of a local exhaust hood enhanced by air curtains / Jia-Ning Fan, Yang Yang, Yi Wang, Zhixiang Cao, Ningbin Zhu, Bo Qian, Songheng Wu, Yu Zhou // Journal of Building Engineering, Volume 59, 2022, 105092, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105092>.

35. *Zhang, J.* Critical velocity of active air jet required to enhance free opening rectangular exhaust hood / Jing Zhang, Jian Wang, Jun Gao, Changsheng Cao, Lipeng Lv, Mengxiao Xie, Lingjie Zeng // Energy and Buildings, Volume 225, 2020, 110316, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110316>.

36. *Lan, C.* Numerical investigation on particle removal and energy consumption of supplied and recirculated ventilation for industrial workshop / Lan C., Diao Y. // Indoor and Built Environment, 32 (6), 2023, pp. 1231 – 1249. DOI: 10.1177/1420326X231157003

37. *Kang, J.H.* Effect of vanes on vortex characteristics of a vortex ventilation system / Kang J.H., Jung S.Y., Kim J.J. // Journal of Building Engineering, 76, 2023, art. no. 107160. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107160

38. *Chen, J.* Performance optimization and experimental analysis of angle grinder with dust collection hood / Chen J., Shi X., Liu S., Wang M., Wang P., Jiang Z // *Process Safety and Environmental Protection*, 179, 2023, pp. 228 – 240. DOI: 10.1016/j.psep.2023.09.004

39. *Tian, Y.* Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee / Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S., Xie X., Li T., Si P // *Building and Environment*, 244, 2023, art. no. 110823, DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823

40. *Yin, Y.* Analysis and optimization of energy loss reduction in a modified tee with deflectors via energy dissipation and vortex strength / Yin Y., Li A., Li J., Wu D., Wang T., Ma Y., Che L // *Energy and Buildings*, 290, 2023, art. no. 113094. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113094

41. *Yin, Y.* Resistance reduction of an elbow with a guide vane based on the field synergy principle and viscous dissipation analysis / Yin Y., Li A., Wen X., Zhang J., Zhang X., Guo J., Li J., Zhang W., Che J. // *Journal of Building Engineering*, 54, 2022, art. no. 104649. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104649

42. *Yin, Y.* Low-resistance optimization and secondary flow analysis of elbows via a combination of orthogonal experiment design and simple comparison design / Yin Y., Li A., Wu D., Li J., Guo J. // *Building and Environment*, 236, 2023, art. no. 110263, DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110263

43. *Yin, Y.* Geometric parameters optimization of low resistance T-junction with guide vanes in HVAC system / 45. Yin Y., Wen X., Zhang J., Li A // *E3S Web of Conferences*, 356, 2022, art. no. 02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056

44. *Lukács, E., Vad, J.* Parameter Study of a Loss Reducing Passive Flow Control Method in a Square-to-square Sudden Expansion (2023) *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 67 (3), pp. 204 - 213, Cited 0 times. DOI: 10.3311/PPme.22389

45. *Zhang, X.* Research on Characteristics of Airway Pressure Loss in Seeding-Wheel-Type Pneumatic Seeder / Zhang X., Wen Z., Wang Q., Li H., Zhang

Z., Liu J. // Agriculture (Switzerland), 12 (12), 2022, art. no. 2021. DOI: 10.3390/agriculture12122021

46. *Kabbara, Z.* HVAC ductwork designs while considering fittings at an early stage / Kabbara Z., Jorens S., Ahmadian E., Verhaert I. // Building and Environment, 237, 2023, art. no. 110272. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110272

47. *Liu F.* Shape optimization of the exhaust hood in machining workshops by a discrete adjoint method, / Fei Liu, Haofu Chen, Hui Yuan, Tengfei (Tim) Zhang, Wei Liu // Building and Environment, Volume 244, 2023, 110764, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110764>.

48. *Khairy E..* Design of a novel gas cyclone vortex finder using the adjoint method. Separation and Purification Technology. 2015 - Volume 142, P. 274-286, DOI: 10.1016/j.seppur.2015.01.010.

49. *Chen, J.* Influence of the Internal Structure Type of a Large-Area Lower Exhaust Workbench on Its Surface Air Distribution / Chen, J.; Jin, L.; Yang, B.; Chen, Z.; Zhang, G. // Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 11395. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811395>

50. *Cascetta, F.* Experimental evaluation of the velocity fields for local exhaust hoods with circular and rectangular openings. Building and Environment. Volume 31, Issue 5. 1996. doi: 10.1016/0360-1323(96)00011-X.

51. *Gao, R.* Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system / R. Gao, K. Liu, A. Li, Z. Fang, Z. Yang, B. Cong // Building and Environment Vol. 129, 2018, P. 130-141

52. *Gao, R.* A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control / R. Gao, Z. Fang, A. Li, K. Liu, Z. Yang, B. Cong // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 132. P. 790-800.

53. **СП 2.2.3670-20.** «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

54. Федеральный закон Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ

55. **ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ.** Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

56. **ГОСТ 12.0.005-2014 ССБТ.** Метрологическое обеспечение в области безопасности труда.

57. **Постановление Правительства РФ от 30.07.2004 № 401** «О федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору».

58. **Постановление Правительства РФ от 16.07.2014 № 665** «О списках работ, производств, профессий, должностей, специальностей и учреждений (организаций), с учетом которых досрочно назначается страховая пенсия по старости, и правилах исчисления периодов работы (деятельности), дающей право на досрочное пенсионное обеспечение».

59. **СанПиН 1.2.3685-21.** «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

60. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

61. Федеральный закон от 30.03.1999 №52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

62. *Егоров В.Н.* Определение запыленности воздуха: Методическое указание пособие / В.Н. Егоров, Д.А. Хабаров. – Москва: ФГБОУ МГУТК, 2016. – 26 с.

63. *Минко, В.А.* Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. – 176 с.

64. *Минко, В.А.* Основы промышленной вентиляции и пневмотранспорта. –Москва, 1975. – 140 с.

65. *Посохин, В. Н.* К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 1 / В. Н. Посохин, А. М. Зиганшин, Е. В.

Варсегова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4(688). – С. 66-73.

66. *Посохин, В. Н.* К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 2 / В. Н. Посохин, А. М. Зиганшин, Е. В. Варсегова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 5(689). – С. 63-70.

67. *Посохин, В. Н.* К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 3 / В. Н. Посохин, А. М. Зиганшин, Е. В. Варсегова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 6(690). – С. 58-65.

68. *Аверкова, О. А.* Разработка и теоретическое обоснование методов расчета и конструирования систем местной обеспыливающей вентиляции: автореферат диссертации ... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Аверкова Ольга Александровна. – Волгоград, 2015. – 22 с.

69. *Минко, В.А.* Обеспыливающая вентиляция: 1-й том / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др.; под ред. В. А. Минко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011.

70. *Минко, В.А.* Обеспыливающая вентиляция: 2-й том / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др.; под ред. В.А. Минко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011

71. Вытяжные устройства // Совплим URL: <https://sovplym.ru/catalog/local-extraction-ventilation/extraction-arms/> (дата обращения: 18.10.2023).

72. Вытяжные рукава и Системы Удаления Выхлопных Газов // Nederman URL: <https://www.nederman.com/ru-ru/products/capture-and-extraction-units> (дата обращения: 18.10.2023).

73. Фиксированный всасывающий рукав MiniTEX // Direct Industry: Fumex URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/fumex/product-106913-1355221.html> (дата обращения: 18.10.2023).

74. Вытяжные рукава KEMPER // Kemper URL: https://www.kemper.eu/ru/Produkty/vytaznye-rukava_kg18991 (дата обращения: 18.10.2023).

75. Всасывающий рукав для установки на потолке Tele 160 // Menegon URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/menegon/product-40036-373175.html> (дата обращения: 18.10.2023).

76. Всасывающий рукав каталог // Kimawent telergo URL: <https://pdf.directindustry.com.ru/pdf-en/klimawent/catalogue-2016/38759-664175.html#open1693457> (дата обращения: 18.10.2023).

77. *Посохин, В.Н.* Аэродинамика вентиляции / Посохин В.Н. - Москва: «АВОК-ПРЕСС», 2008. - 214 с.

78. *Логачев, К.И.* Геометрические характеристики течений на входе в отсосы, выполненные в виде зонтов / К.И. Логачев, В.Н. Посохин, А.И. Пузанок // Инженерные системы; АВОК Северо-Запад. – 2005. – № 1(17). – С.12–14.

79. *Идельчик, И.Е.* Некоторые интересные эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике / И. Е. Идельчик. - Москва : Машиностроение, 1982. - 97 с. : граф., рис. - Библиогр.: с. 92-96.

80. *Идельчик, И.Е.* - Гидравлические сопротивления : (физико-механические основы) / И. Е. Идельчик. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1954. - 316 с. : граф., рис., табл. - Библиогр.: с. 314-316.

81. *Идельчик, И.Е.* Гидравлические сопротивления при входе потока в каналы и протекании через отверстия / И. Е. Идельчик - В кн.: Промышленная аэродинамика. ЦАГИ, БНТ, 1944, №2. с. 27-57.

82. *Богословский, В.Н.* Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха - 3-е изд. - / Богословский В.Н., Шепелев И.А., Эльтерман В.М. // Москва: Стройиздат, 1977. - 509 с.

83. *Зиганшин, А.М.* Вихревая вентиляция. / А.М. Зиганшин, К.И. Логачев // М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. - 288 с.

84. *Талиев В.Н.* Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. — Москва: Стройиздат, 1979. — 295 с.

85. *Посохин, В.Н.* АЗ-877. Рекомендации по расчету отсосов от оборудования, выделяющего тепло и газы / В.Н. Посохин. — Москва: ГОССТРОЙ СССР, 1983. — 25 с.

86. *Катков, М.В.* Течение вблизи щелевого бокового отсоса / Катков М.В., Лабуткин А.Г., Салимов Н.Б., Посохин В.Н. // Известия вузов. Строительство – 1998. №11-12. – С.96-100

87. *Посохин В.Н.* Экспериментальное изучение вихревых зон в потоках вблизи всасывающих щелевых отверстий / Посохин В.Н., Катков М.В. // Известие вузов. Авиационная техника. – 2001. - №1. – С.61-63.

88. *Лифанов, И.К.* Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн / И.К. Лифанов. 1995. – 520 с.

89. *Гоман, О.А.* Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман [и др.] ; под ред. М. И. Ништа. – Москва : Машиностроение, 1993. – 288 с.

90. *Тирон, О. В.* Совершенствование методов математического моделирования для конструирования и модернизации местных отсосов над непроницаемой плоскостью: специальность 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тирон О.В. ; БГТУ им. В.Г. Шухова. — Белгород, 2023. — 171 с.

91. *Гольцов, А. Б.* Совершенствование методов расчета и конструкций вентиляционных устройств локализации источников пылевыведений: специальность 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гольцов А.Б.; БГТУ им. В.Г. Шухова. - Белгород, 2023. - 355 с.

92. *Посохин В.Н.* К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба / Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. // Известия вузов. Строительство - 2002. Сообщение 1. - №8 - С.70-76; Сообщение 2. - №9 - С. 80-85; Сообщение 3. - №10 - С.81-85.

93. *Логачев, К.И.* Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей / К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Посохин // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2004. – № 7-8. – С.61-69.

94. *Шепелев, И.А.* Воздушные потоки вблизи всасывающих отверстий // Тр. НИИсантехники. - М., 1967. - № 24.

95. *Шепелев, И.А.* Аэродинамика воздушных потоков в помещении. - М.:Стройиздат, 1978,- 145 с.

96. *Алтынова, А.Л.* Изменение осевой скорости во всасывающем факеле у эллиптического отверстия в плоской стенке // Водоснабжение и санитарная техника. - 1974 .-№ 5.

97. *Алтынова, А.Л.* Изменение осевой скорости на грани прямого угла при расположении в нем круглого всасывающего отверстия // Отопление и вентиляция. - Иркутск, 1976. - С.53 -57.

98. *Тягло И.Г.* О параметрах воздушного потока возле прямоугольного отсасывающего отверстия / Тягло И.Г., Шепелев ИА. // Тр. НИИсантехники. - М., 1969. - № 30.

99. *Мазья, В. Г.* Граничные интегральные уравнения, Итоги науки и техн. Сер. Современ. пробл. мат. Фундам. направления, 1988, том 27, с. 131–228

100. *Бреббия К.* Методы граничных элементов / *Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л.* // М. :Мир, 1987. - 525с.

101. *Бреббия К., Уокер С.* Применение метода граничных элементов к технике. - М.:Мир, 1982.-248 с.

102. *Логачев, К.И.* Аэродинамические основы аспирации / К.И. Логачев, И.Н.Логачев. — Монография. — Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. — 658 с.

103. *Посохин, В. Н.* Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В. Н. Посохин. - Москва :Машиностроение, 1984. - 160 с.

104. *Позин, Г. М.* Методы расчета полей скоростей, образуемых щелевыми отсосами в ограниченном пространстве / Г. М. Позин, В. Н. Посохин // Безопасность и гигиена труда. - 1980. - С. 52 -57.

105. *Логачев, К. И.* Экологическая индустрия: Математическое моделирование систем вентиляции промпредприятий / К. И. Логачев // Инженерная экология. - 1999. - № 1. - С. 8-18.

106. *Логачев, И. Н.* Потенциальное движение воздуха у всасывающей щели / И. Н. Логачев // Вентиляция и очистка воздуха. - Москва : Недра, 1969. -С.143-150.

107. *Белоцерковский, С. М.* Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / С. М. Белоцерковский, А. С. Гиневский. - Москва : Физматлит, 1995. - 368 с.

108. *Логачев, И. Н.* Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / И. Н. Логачев [и др.] // Вычислительные методы и программирование. - 2010. - Т. 11, № 1. - С. 43-52.

109. *Логачев, К.И.* Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка / К.И. Логачев, В.Н. Посохин // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 2004. – № 1. – С. 29–32.

110. *Логачев, К.И.* Расчет вихревого течения у щелевидного бокового отсоса / К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Посохин // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2004. – № 6. – С. 64-69.

111. *Ляскин, А.С.* Метод дискретных вихрей в задачах аэродинамики деформируемых поверхностей // Сборник трудов студентов и аспирантов факультета летательных аппаратов Выпуск 4. - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва , 2001

112. *Аверкова О.А.* Методы расчета и конструирования систем местной обеспыливающей вентиляции. - Монография изд. - Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. - 221 с.

113. *Аверкова, О.А.* Моделирование отрывного течения на входе в квадратный всасывающий канал / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др. // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2013. – № 6. – С. 97–104.

114. *Ходаков, И.В.* Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №2. – С. 11-15.

115. *Аверкова, О.А.* Моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др. // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2013. – Т.14. – С. 246–253.

116. *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. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-774-6-39-53.

117. *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. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-775-7-61-71.

118. *Железняк, В. Н.* Моделирование методом магнитной аэрогидродинамической аналогии трехмерного обтекания летательных аппаратов с учетом работы силовых установок / Железняк В. Н., Макаров Л. Н., Мальнев В. Н., Пирогов В. В. // Ученые записки ЦАГИ. 1985. №5.

119. *Коньшев, И.И.* Расчет некоторых пространственных всасывающих факелов / И.И. Коньшев, А.Г. Чесноков, С.Н. Щадрова // Изв.вузов. Технология текстильной промышленности – 1976 - №4 – с. 144-149.

120. *Jamie M. Johns* - Navier stokes 2D numerical solve incompressible flow with custom scenarios MATLAB // GitHub URL: <https://github.com/JamieMJohns/Navier-stokes-2D-numerical-solve-incompressible-flow-with-custom-scenarios-MATLAB-/blob/master/Readme.pdf> (дата обращения: 27.10.2023).

121. *Темам, Р.* Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ. — 2-е изд. — М.: Мир, 1981. — 408 с

122. *Андерсон, Д.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т.: Пер. с англ. / Андерсон, Д., Таннехил Дж., Плетчер Р //— М.: Мир, 1990 — 385 с.

123. *Лукьянов, И.И.* Современные подходы к моделированию турбулентных течений // Символ науки - 2016 - №12-1 – с.12-13

124. *Волков, К. Н., Емельянов В. Н.* Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 368 с.

125. *Гарбарук, А.В.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., М.Л Шур // - СПб: Изд-во Политехн. унта, 2012. - 88 с.

126. *Зиганшин, А. М.* Валидация компьютерной модели течения в вытяжном и приточном симметричных вентиляционных тройниках / А. М. Зиганшин, Г. Р. Сафиуллина, С. В. Еремина, А. А. Гайфуллин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2021. — № 1(55). — С. 58-71.

127. *Зиганшин, А. М.* Повышение энергоэффективности систем вентиляции посредством профилирования фасонных элементов / А. М. Зиганшин, К. Э. Батрова, Г. А. Гимадиева [и др.] // Строительство и техногенная безопасность. — 2019. — № 15(67). — С. 111-123.

128. *Зиганшин, А. М.* Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей / А. М. Зиганшин, Е. Э. Беляева, В. А. Соколов // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2017. — № 1(697). — С. 108-116.

129. Багоутдинова, А.Г. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах сложной конфигурации с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation / Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д., Шемелова О.В. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №14

130. Антипова, М.С. Компьютерное моделирование истечения холодной сверхзвуковой струи из конического сопла с использованием программного пакета FLOEFD / Антипова М.С., Дядькин А.А., Запрягаев В.И., Крылов А.Н. // Космическая техника и технологии. 2016. №1 (12).С 5-11.

131. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 1040 с

132. Okhotnikov, A, Numerical and experimental investigation of the metering characteristic and pressure losses of the rotary tubular spool valve / Ivan Okhotnikov, Karem Abuowda, Siamak Noroozi, Philip Godfrey // Flow Measurement and Instrumentation, Volume 71, 2020, 101679, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.101679.

133. Ткаченко, В. А. Совершенствование систем местной обеспыливающей вентиляции за счет создания и использования закрученных потоков : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ткаченко Виктория Александровна ; БГТУ им. В.Г. Шухова. — Белгород, 2021. — 155 с.

134. FloEFD Validation Examples // Mentor Graphics URL: <https://www.smart-fem.de/media/floefd/floefd-validation1.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).

135. NAFEMS - the International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community [Electronic resource]. URL: https://www.nafems.org/downloads/dropbox/resource_center/wt09.pdf.

136. *Идельчик, И. Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.

137. *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; 63, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105490>

138. *Kulmala, I.* Air flow near an unflanged rectangular exhaust opening / Kulmala I., Saarenrinne P. // Energy and Buildings. 1996. Vol. 24, P. 133–136. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(96\)00971-1](https://doi.org/10.1016/0378-7788(96)00971-1).

139. *Fletcher B.* Centreline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction/ / The Annals of Occupational Hygiene. 1977. Vol. 20, no. 2. P.141–146. <https://doi.org/10.1093/annhyg/20.2.141>.

140. *Павлов, Н. Н.* Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Н. Н. Павлов, Ю. И. Шиллер (ред.). --- М. : Стройиздат. 1992. --- 172 с.

141. *Белов, С. В.* Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование / С. В. Белов, А. Ф. Козьяков, О. Ф. Партолин [и др.] ; под ред. С. В. Белова. --- М. : Машиностроение, 1989. --- 368 с.

142. *Kurkin, E.I.* Algebraic and k- ϵ Turbulence Model Comparison in the Problem of the Boundary Layer on the Walls of a Rotating Axisymmetric Diffuser / E.I. Kurkin, V.G. Shakhov // Procedia Computer Science, Volume 65, 2015, pp.133-139, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.092.

143. *Саутин, С.Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии - Ленинград : Химия. Ленингр. отд-ние, 1975. - 48 с.

144. *Юдин, Ю.В.* Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Ф. В. Водолазский. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 124 с.

145. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614016 Российская Федерация. «Расчет границ вихревых зон при входе в круглый отсос-раструб с выступом» : № 2023612659 : заявл. 13.02.2023: опубл. 21.02.2023 / О. А. Аверкова, К. И. Логачев, О. В. Тирон, Т. А. Козлов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

146. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613911 Российская Федерация. «Определение границ вихревых зон при входе в круглые отсосы-раструбы с тремя полками» : № 2023612661 : заявл. 13.02.2023: опубл. 21.02.2023 / О. А. Аверкова, К. И. Логачев, О. В. Тирон, Т. А. Козлов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

147. *Logachev, K.I.* A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova, A.K. Logachev, // *Energy Build.* 173 (2018) 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>.

148. *Crescente E. Figueroa.* Hood Entry Coefficients of Compound Exhaust Hoods, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2011, 8:12, 740-745, DOI: 10.1080/15459624.2011.628605

149. **ГОСТ 12.3.018-79.** Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. (Введение в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 5 сентября 1979 г. N 3341). Дата введения 1981-01-01.

150. *Турчак, Л.И.* Основы численных методов. / Турчак, Л.И., Плотников П // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 стр.

151. *Писаренко, В.Л.* Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве / Писаренко В.Л., Рогинский М.Л. // - М. Машиностроение, 1981 – 120 с.

152. **ГОСТ Р 56295-2014** «Энергоэффективность зданий. Методика экономической оценки энергетических систем в зданиях». Дата актуализации: 01.01.2021

153. *Виноградов, Д. В.* Экономика систем теплогазоснабжения и вентиляции: учеб. пособие / Д. В. Виноградов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. – 104 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№2023614016 «Расчет границ вихревых зон при входе в круглый отсос-
раструб с выступом»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023614016.

**«Расчет границ вихревых зон при входе в круглый
отсос-раструб с выступом»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Аверкова Ольга Александровна (RU), Логачев
Константин Иванович (RU), Тирон Олег Викторович
(RU), Козлов Тимур Алексеевич (RU)*

Заявка № **2023612659**
Дата поступления **13 февраля 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **21 февраля 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№2023613911 «Определение границ вихревых зон при входе в круглые
отсосы-раструбы с тремя полками»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023613911

**«Определение границ вихревых зон при входе в круглые
отсосы-раструбы с тремя полками»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Аверкова Ольга Александровна (RU), Логачев
Константин Иванович (RU), Тирон Олег Викторович
(RU), Козлов Тимур Алексеевич (RU)*

Заявка № **2023612661**
Дата поступления **13 февраля 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **21 февраля 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Акт внедрения местного отсоса-раструба с тремя полками в завод ООО
«ЯКЗ»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

"Якутский котловый завод"

ИНН 1435274626, ОГРН 1131447015996,

г. Якутск, ТОР «Якутия», с. Капитоновка, ул. Семенова 26/5

Утверждаю

Директор ООО «Якутский котловый завод»



Тимофеев П.С.

«04» марта 2024 г.

АКТ

внедрения конструкции местного отсоса-раструба с тремя полками в эксплуатацию

Комиссия в составе:

Главный инженер – Прокопьев В.В.

Ведущий научный сотрудник – к.т.н. Слободчиков Е.Г.

Ознакомившись с конструкцией местного отсоса-раструба с составными полками, изготовленный по адресу: Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова 46, на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, по результатам проведенных натурных испытаний в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 (Система стандартов безопасности труда. Методы аэродинамических испытаний) в период 06.02.2024 по 22.02.2024, установила:

1. Местный отсос-раструб с тремя полками соответствует заявленным требованиям, с учетом следующих замечаний: замечаний нет.
2. За счет применения местного отсоса-раструба с тремя полками удалось понизить потери давления в канале на 21% и коэффициент местного сопротивления на 57%, повысить скорость захвата загрязняющих веществ на 53%, что улучшило условие труда на столе сварки и резки металлов в сварочном цеху.
3. Местный отсос-раструб с тремя полками рекомендовано ввести в эксплуатацию в сварочном цехе для улавливания сварочных аэрозолей и пылевыведений.

Главный инженер

Прокопьев В.В.

Ведущий научный сотрудник

Слободчиков Е.Г.




Акт промышленных испытаний ООО «ЯКЗ»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

"Якутский котловый завод"

ИНН 1435274626, ОГРН 1131447015996,

г. Якутск, ТОР «Якутия», с. Капитоновка, ул. Семенова 26/5

АКТ

промышленных испытаний

1. Для испытаний предоставлено: отсос-раструб с тремя полками, условным диаметром 200 мм

2. Даты проведения испытаний: в период 06.02.2024 по 22.02.2024.

3. Задачи тестирования, требования, предъявляемые к качеству и безопасности образца: выявление потерь давления, скорости воздуха при входе и в канале, сравнение с существующим отсосом для стола сварки и резки металлов.

4. Сведения о специалистах, ответственных за проведение тестирования:

№	ФИО	Должность
1	Прокопьев Виталий Витальевич	Главный инженер ООО «ЯКЗ»
2	Слободчиков Егор Гаврильевич	Ведущий научный сотрудник ООО «ЯКЗ»
3	Козлов Тимур Алексеевич	Инженер ТГВ БГТУ им. В.Г. Шухова

5. Описание методики:

Измерение скорости производились в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79

Измеряемые величины и приборы:

№, п/п	Измеряемый параметр	СИ	Наименование прибора
1.	Температура	°C	АТЕ-1034
2.	Скорость воздуха	м/с	АТЕ-1034
3.	Статистическое давление	Па	Testo 510
4.	Динамическое давление	Па	Testo 510

6. Результаты испытаний:

№	Условия	v , м/с	$P_{\text{дин}}$, Па	$P_{\text{п}}$, Па	$P_{\text{канал дин}}$, Па	$P_{\text{канал п}}$, Па	L , м ³ /ч	ζ
1	Круглый отсос раструб с тремя полками	6,9	28,8	3,0	45,3	72,7	779,9	0,104
2	Круглый отсос раструб с углом наклона 30 градусов	6,8	27,9	6,8	47,0	92,0	768,7	0,243

7. Общий вывод и заключения:

При использовании круглого отсоса-раструба с тремя полками потери давления в канале снижаются на 21%, после отсоса-раструба и гибкого воздуховода снижается в т.2 на 55%, скорость воздуха в канале повышается на 0,1 м/с, расход воздуха увеличилось на 1,5%, коэффициент местного сопротивления снизился на 57%.

Подпись представителя:

Главный инженер



Прокопьев В.В.



Акт внедрения в проектную деятельность программных продуктов для
проектирования и расчета систем вытяжной вентиляции



Общество с ограниченной ответственностью «Техэнерго»

ИНН 1435288410, КПП 143501001, ОГРН 1141447013575

677008, г. Якутск, ул. Лонгинова, 12А

эл. почта: tenergo14@mail.ru

тел: 8(964)419-80-04

№ 202 от 06.03.2024

АКТ

**о внедрении в проектную деятельность программных продуктов для
проектирования и расчета систем вытяжной вентиляции**

Комиссия в составе:

Федоров В.Б. – директор ООО «Техэнерго»

Стручков Е.Г. – инженер ОБ ООО «Техэнерго»

Иванов А.С. – инженер ОБ ООО «Техэнерго»

Козлов Т.А. – представитель БГТУ им В.Г. Шухова

Комиссия составила настоящий акт о том, что разработанные в БГТУ им. В.Г. Шухова программы для ЭВМ «Расчет границ вихревых зон при входе в круглый отсос-раструб с выступом» (№2023614016), «Определение границ вихревых зон при входе в круглые отсосы-раструбы с тремя полками» (№2023613911) внедрены в проектную деятельность и используются при разработке систем вытяжной вентиляции.

Федоров В.Б.

Стручков Е.Г.

Иванов А.С.

Козлов Т.А.

Акт внедрения в учебную деятельность в кафедре ТГВ в БГТУ им. В.Г.
Шухова



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

БГТУ им. В.Г. Шухова

Евтушенко Е.И.

«26» 02 2024 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс материалов диссертационной работы аспиранта кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

Козлова Тимура Алексеевича

Комиссия в составе:

Председатель:

Заведующей кафедрой ТГВ

Профессор, д.т.н. Уваров В.А.

Члены комиссии:

Профессор, д.т.н. Гольцов А.Б.

Доцент, к.т.н. Попов Е.Н.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Козлова Т.А. «Моделирование воздушных течений при входе в местные отсосы-раструбы с составными полками» используется для проведения лекционных, практических, лабораторных занятий по следующей дисциплинам:

Бакалавр по профилю «Теплогазоснабжение и вентиляция» в рамках направления 08.03.01 «Строительство»:

– Математическое моделирование систем теплогазоснабжения и вентиляции.

Магистратура по направлению подготовки «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» в рамках направления 08.04.01 «Строительство»:

– Математическое моделирование процессов отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;

– Численные методы решения задач отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Председатель:

Уваров В.А.

Члены комиссии:

Гольцов А.Б.

Попов Е.Н.

Результаты замеров натуральных экспериментов

Отсос-раструб с выступом

d/R=2, a=90grad, dv/R=0								
В точке 1								
Рпот, Па	98	93	91	95	90	95	96	93
	90	76	75	99	81	79	97	96
В точке 2								
Рпот, Па	43	45	40	42	41	39	41	50
	50	60	63	62	65	62	64	67
В точке 3								
Рпот, Па	78	79	76	70	65	61	59	45
	50	44	52	37	33	32	34	43
В точке 4								
Рпот, Па	74	57	74	75	82	72	68	73
	71	73	84	61	69	59	68	76

V_{ср} 18,80P_{ср}, Па 66,75P_{дин}, Па 209,62

ζ 0,318

d/R=2, a=75grad, dv/R=0								
В точке 1								
Рпот, Па	78	73	81	75	80	95	76	75
	73	75	70	72	82	89	71	70
В точке 2								
Рпот, Па	70	71	77	78	73	78	70	77
	70	75	69	66	60	60	67	65
В точке 3								
Рпот, Па	18	19	16	50	45	41	59	45
	35	19	26	16	20	17	15	17
В точке 4								
Рпот, Па	52	37	33	32	34	43	52	49
	26	16	20	17	15	17	25	19

V_{ср} 18,23P_{ср}, Па 51,66P_{дин}, Па 189,80

ζ 0,272

d/R=2, a=60grad, dv/R=0								
В точке 1								
Рпот, Па	66	65	78	59	42	77	44	59
	60	50	49	71	66	71	84	80
В точке 2								
Рпот, Па	39	21	25	38	22	30	43	33
	36	27	17	30	21	30	44	32
В точке 3								
Рпот, Па	30	36	42	36	38	44	39	32
	35	19	26	16	20	17	15	17
В точке 4								
Рпот, Па	37	36	45	34	51	54	36	53
	37	39	34	32	35	37	34	36

Уср 18,23

Рср, Па 40,64

Рдин, Па 189,80

ζ 0,214

d/R=2, a=45grad, dv/R=0								
В точке 1								
Рпот, Па	67	66	70	20	37	51	47	88
	81	100	57	41	47	50	108	117
В точке 2								
Рпот, Па	42	36	44	33	34	24	26	19
	17	14	25	36	22	13	20	21
В точке 3								
Рпот, Па	34	32	31	21	23	30	38	39
	15	19	14	11	11	15	19	10
В точке 4								
Рпот, Па	31	34	39	68	74	53	57	47
	31	40	61	55	53	65	72	68

Уср 17,68

Рср, Па 41,92

Рдин, Па 185,76

ζ 0,226

d/R=2, a=30grad, dv/R=0								
В точке 1								
Рпот, Па	50	51	62	63	73	53	59	59
	60	33	44	56	52	55	47	33

В точке 2								
Р _{пот} , Па	42	33	28	22	11	10	11	18
	25	9	14	12	27	26	33	24
В точке 3								
Р _{пот} , Па	13	22	11	19	12	21	14	20
	15	27	26	21	22	14	13	5
В точке 4								
Р _{пот} , Па	38	54	65	61	74	55	73	55
	34	53	76	39	37	42	48	61

V_{ср} 19,27

Р_{ср}, Па 36,48

Р_{дин}, Па 220,67

ζ 0,165

d/R=2, a=90grad, dv/R=0,5										
В точке 1										
Р _{пот} , Па	66	88	58	82	60	57	63	60	52	51
Р _{дин} , Па	160	172	155	169	156	160	143	148	144	153
В точке 2										
Р _{пот} , Па	51	43	66	55	53	42	67	59	58	56
Р _{дин} , Па	181	195	174	178	189	201	187	191	180	176
В точке 3										
Р _{пот} , Па	26	23	35	43	34	34	39	27	35	58
Р _{дин} , Па	199	197	191	195	184	193	194	187	168	43
В точке 4										
Р _{пот} , Па	66	63	67	63	67	52	57	40	46	51
Р _{дин} , Па	127	124	118	135	130	128	120	130	120	76

V_{ср} 18,80

Р_{ср}, Па 52,83

Р_{дин}, Па 159,28

ζ 0,332

d/R=2, a=75grad, dv/R=0,5										
В точке 1										
Р _{пот} , Па	80	73	68	69	88	85	82	71	49	80
Р _{дин} , Па	168	137	153	154	154	147	157	135	139	
В точке 2										
Р _{пот} , Па	14	12	11	16	23	24	22	28	29	18

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	185	184	183	183	190	189	179	178	176	
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	25	26	21	20	24	25	26	25	15
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	204	193	191	193	192	199	196	205	195	201
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	49	55	74	79	53	52	58	61	49	45
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	162	172	177	172	163	161	172	147	152	157

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 43,60

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 173,18

ζ 0,252

$d/R=2, a=60\text{grad}, dv/R=0,5$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	54	46	62	75	64	67	72	49	81	56
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	145	133	157	163	132	153	154	179	167	164
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	39	50	47	32	28	26	28	50	45	29
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	184	163	160	171	172	184	178	187	200	206
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	48	51	30	44	24	32	28	15	25	20
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	205	206	218	192	186	195	199	200	197	183
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	30	28	35	24	23	28	20	25	26	21
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	189	180	182	189	185	187	168	171	172	166

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 39,43

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 178,05

ζ 0,221

$d/R=2, a=45\text{grad}, dv/R=0,5$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	55	50	36	31	36	38	37	30	41	57
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	170	152	167	166	162	150	162	177	164	172
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	7	17	21	18	24	19	57	25	22	15
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	185	177	173	191	187	180	198	177	173	194

В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	6	9	18	10	12	13	11	8	3	12
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	192	202	195	197	194	204	199	196	201	207
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	57	53	65	70	74	84	94	80	71	80
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	148	145	149	132	137	133	124	139	138

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 36,65

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 172,58

ζ 0,206

$d/R=2, a=30\text{grad}, dv/R=0,5$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	19	16	17	11	23	24	22	30	25	16
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	187	192	198	190	196	195	199	194	197
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	34	33	30	33	32	34	38	40	32	35
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	190	192	202	195	206	199	203	201	206	203
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	33	11	5	12	9	13	15	22	26	15
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	191	189	198	186	187	189	192	196	186	185
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	45	35	25	29	26	46	21	25	38	47
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	175	167	175	174	162	173	163	176	187	179

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 26,05

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 189,23

ζ 0,148

$d/R=2, a=90\text{grad}, dv/R=1$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	55	59	71	77	89	75	81	74	81	76
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	160	172	155	169	156	160	143	148	144	153
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	26	25	15	26	40	30	12	21	25	13
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	181	195	174	178	189	201	187	191	180	176
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	57	49	25	26	30	39	33	45	36	32

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	200	199	197	191	195	184	193	194	187	168
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	85	87	86	76	84	72	64	77	93	76
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	160	170	161	172	168	170	168	172	164	169

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 53,58

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 174,85

ζ 0,306

$d/R=2, a=75\text{grad}, dv/R=1$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	42	58	66	62	44	50	60	50	22	47
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	145	133	157	163	132	153	154	179	167	164
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	32	33	37	52	50	59	49	50	31	20
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	205	206	218	192	186	195	199	200	197	183
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	38	51	20	27	32	24	44	49	43	40
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	184	163	160	171	172	184	178	187	200	206
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	31	35	30	39	40	27	34	29	36	37
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	189	180	182	189	185	187	168	171	172	166

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 40,50

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 178,05

ζ 0,227

$d/R=2, a=60\text{grad}, dv/R=1$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	44	61	48	58	59	44	61	66	62	53
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	167	162	147	169	148	134	142	173	143	148
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	10	0	2	0	3	16	10	19	11	13
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	200	186	197	191	185	183	193	194	179	197
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	21	10	15	12	46	18	14	16	13	30
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	193	191	196	206	202	201	200	203	206	197

В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	31	35	30	39	40	27	34	29	36	37
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	167	179	176	182	183	185	172	167	174	183

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 29,33

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 180,03

ζ 0,163

$d/R=2, a=45\text{grad}, dv/R=1$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	52	53	51	44	50	44	45	47	32	36
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	175	167	175	174	162	173	163	176	187	179
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	10	7	15	9	22	25	21	13	14	11
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	187	192	198	190	196	195	199	194	197
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	51	40	41	45	33	36	40	42	43	46
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	190	192	202	195	206	199	203	201	206	203
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	45	50	58	60	51	54	64	56	60	61
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	191	189	198	186	187	189	192	196	186	185

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 39,43

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 189,23

ζ 0,208

$d/R=2, a=30\text{grad}, dv/R=1$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	41	49	52	53	63	49	46	42	40	50
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	170	152	167	166	162	150	162	177	164	172
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	13	12	10	4	11	13	9	22	8	5
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	185	177	173	191	187	180	198	177	173	194
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	64	65	29	26	36	48	47	32	23	17
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	192	202	195	197	194	204	199	196	201	207
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	13	4	3	7	6	9	8	11	10	7

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	148	145	149	132	137	133	124	139	138
$V_{\text{ср}}$	18,80									
$P_{\text{ср}}, \text{Па}$	26,43									
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	172,58									
ζ	0,148									

$d/R=2, a=90\text{grad}, dv/R=2$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	40	41	46	42	41	55	46	51	42	49
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	181	195	174	178	189	201	187	191	180	176
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	45	46	45	42	41	47	51	59	50	47
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	188	185	185	178	186	190	187	175	170	175
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	24	32	22	19	10	27	17	34	23	34
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	173	162	155	154	171	165	163	164	167	168
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	30	29	17	21	19	26	41	38	24	32
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	160	170	161	172	168	170	168	172	164	169

$V_{\text{ср}}$	18,80
$P_{\text{ср}}, \text{Па}$	36,13
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	174,68
ζ	0,207

$d/R=2, a=75\text{grad}, dv/R=2$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	19	21	27	19	22	15	10	14	21
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	148	137	153	154	154	147	157	135	139	140
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	28	29	22	31	22	24	30	28	24	25
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	185	184	183	183	190	189	179	178	176	145
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	45	47	44	68	63	56	53	51	43	46
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	177	181	172	175	173	176	174	188	196	201
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	26	35	52	35	32	36	44	28	50	53

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	162	172	177	172	163	161	172	147	152	157
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 33,95

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 167,60

ζ 0,203

$d/R=2, a=60\text{grad}, dv/R=2$										
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

В точке 1										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	30	32	25	29	33	35	30	41	45	25
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	145	133	157	163	132	153	154	179	167	164
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 2										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	22	28	29	21	28	19	25	35	36
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	184	163	160	171	172	184	178	187	200	206
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 3										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	27	26	29	26	29	32	32	12	12	11
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	189	180	182	189	185	187	168	171	172	166
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 4										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	29	28	22	20	20	21	28	22	22	24
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	205	206	218	192	186	195	199	200	197	183
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$V_{\text{ср}}$ 18,80

$P_{\text{ср}}, \text{Па}$ 26,50

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$ 178,05

ζ 0,149

$d/R=2, a=45\text{grad}, dv/R=2$										
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

В точке 1										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	27	28	19	34	25	37	20	28	33	28
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	170	152	167	166	162	150	162	177	164	172
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 2										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	27	15	13	6	0	10	12	23	4
-----------------------------	----	----	----	----	---	---	----	----	----	---

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	185	177	173	191	187	180	198	177	173	194
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 3										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	20	29	30	27	33	37	37	36	39
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	192	202	195	197	194	204	199	196	201	207
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В точке 4										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	35	25	45	27	29	33	28	35	28	32
-----------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	148	145	149	132	137	133	124	139	138
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$V_{\text{ср}}$	18,80
$P_{\text{ср}}, \text{Па}$	25,85
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	172,58
ζ	0,150

$d/R=2, a=30\text{grad}, dv/R=2$										
В точке 1										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	20	20	28	24	26	28	27	25	34	14
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	175	167	175	174	162	173	163	176	187	179
В точке 2										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	18	24	32	26	35	32	18	28	24	21
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	194	187	192	198	190	196	195	199	194	197
В точке 3										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	23	30	18	14	26	27	26	25	26	19
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	190	192	202	195	206	199	203	201	206	203
В точке 4										
$P_{\text{пот}}, \text{Па}$	34	41	38	35	36	30	28	35	29	32
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	170	179	174	180	181	164	167	165	161	169

$V_{\text{ср}}$	18,80
$P_{\text{ср}}, \text{Па}$	26,90
$P_{\text{дин}}, \text{Па}$	184,50
ζ	0,146

Отсос-раструб с тремя полками

$\alpha=0 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
160	162	165	160	161	158	156	153	154	152
168	164	169	166	168	166	165	167	168	171
176	173	170	173	172	168	172	169	167	165
169	165	166	172	170	171	173	166	167	172
172	170	170	173	172	168	173	169	174	172
Динамическое давление, Па									
113	99	111	125	124	127	117	135	127	134
166	150	149	154	158	152	161	154	157	161
155	161	154	158	160	158	152	156	158	163
141	142	140	134	133	141	140	141	133	131
110	106	113	106	102	103	107	101	100	109
$\alpha=20 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
180	178	176	179	177	175	178	184	181	175
178	177	182	175	180	176	184	180	178	179

176	182	178	180	177	178	178	176	177	175
180	185	175	177	180	181	178	179	175	180
176	182	176	177	178	180	183	179	178	177
Динамическое давление, Па									
122	107	124	123	149	150	147	156	150	133
161	165	166	175	165	170	157	155	154	157
169	171	172	168	167	169	168	169	165	162
153	144	157	157	150	169	165	163	153	152
134	144	151	158	136	146	155	138	140	122
$\alpha=25 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
160	159	160	161	160	156	157	161	149	155
166	162	165	164	167	161	161	163	166	165
166	162	166	163	161	159	162	161	163	164
161	159	161	164	163	165	166	158	165	164
160	161	163	161	164	161	163	165	164	165
Динамическое давление, Па									
156	152	134	115	153	156	155	156	144	110
144	140	148	164	142	153	148	154	158	163
161	163	157	156	165	147	154	159	155	163
144	128	128	137	141	139	150	157	144	142
107	102	130	101	106	109	121	103	105	97
$\alpha=30 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
166	162	165	162	165	165	167	164	163	165
164	165	165	168	167	164	162	161	165	164
162	163	162	163	168	167	165	165	168	164
165	163	165	162	159	160	163	164	165	166
167	168	165	168	166	166	160	167	163	164
Динамическое давление, Па									
108	115	135	143	121	137	142	141	143	151
141	158	143	146	144	138	140	131	143	142
163	154	158	154	157	156	157	159	150	158
148	157	148	149	148	145	137	140	156	151
147	151	132	150	137	155	147	140	140	148
$\alpha=35 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
164	165	163	161	163	164	167	166	165	169
162	161	159	166	162	159	166	165	163	168
157	164	166	163	166	163	164	162	167	162
164	164	161	159	166	165	158	168	162	164
162	162	165	156	162	165	164	159	162	164
Динамическое давление, Па									
131	124	128	153	128	151	148	151	127	145
136	150	158	148	138	143	141	156	152	159
166	164	161	159	156	155	162	156	154	161
127	131	132	127	132	143	136	148	128	136

144	125	123	118	14	117	122	121	127	127
$\alpha=40 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
160	163	164	166	165	165	164	163	165	167
161	163	164	161	158	162	164	163	161	163
164	160	164	163	159	161	163	162	166	163
163	164	168	168	165	167	170	156	153	149
166	169	162	166	168	167	165	163	161	164
Динамическое давление, Па									
122	120	126	137	145	145	118	124	156	150
123	131	137	131	130	144	125	123	155	140
155	157	162	158	157	162	160	162	159	165
155	150	145	146	159	155	154	142	157	155
140	126	131	138	127	134	153	127	123	159
$\alpha=60 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
152	153	158	154	152	154	153	167	163	164
162	161	158	157	160	158	163	162	159	156
168	158	166	160	161	162	165	163	158	157
161	165	162	161	163	161	162	162	168	162
155	162	164	163	161	163	165	162	163	165
Динамическое давление, Па									
132	130	144	135	138	125	107	115	128	122
136	155	147	151	149	156	140	136	147	142
159	160	161	156	162	158	160	161	160	166
131	126	137	138	133	135	133	129	119	130
103	99	106	109	108	107	126	109	117	112
$\alpha=75 \gamma=90 d1=d3=20\text{см} d2=10\text{см}$									
Статическое давление, Па									
170	164	165	161	157	161	162	163	158	166
161	166	166	160	158	155	163	160	160	161
163	160	163	163	161	165	166	161	164	163
163	164	163	162	160	159	165	163	163	161
163	166	163	160	162	165	169	166	168	163
Динамическое давление, Па									
102	105	126	115	117	123	126	117	109	122
144	151	146	144	150	138	139	147	142	152
155	163	154	159	156	158	158	161	164	165
150	152	143	142	156	153	147	152	158	161
124	125	103	107	128	139	133	131	134	138