

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

На правах рукописи

Ходаков Илья Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ
НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ
МЕСТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ОТСОСОВ**

05.23.03 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доцент Аверкова Ольга Александровна

Белгород – 2016

Оглавление

Введение	4
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ НЕПЛОТНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	11
1.1 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с использованием теории функций комплексного переменного	11
1.2 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с использованием метода дискретных вихрей.....	22
1.3 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с учетом сил вязкости	34
1.4 Рекомендации по снижению расхода воздуха, поступающего в неплотности ..	39
Выводы по первой главе.....	41
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ПОТОКОВ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ	43
2.1 Разработка вычислительного алгоритма на примере задачи об истечении идеальной несжимаемой жидкости из дна резервуара	43
2.1.1 Решение задачи с использованием конформных отображений и метода Н.Е. Жуковского.....	43
2.1.2 Сопоставление результатов расчета в частных случаях.....	50
2.1.3 Решение задачи с использованием стационарных дискретных вихрей	55
2.2 Моделирование отрыва потока на входе в круглый всасывающий канал с кольцевым механическим экраном, снабженным выступом	59
2.2.1 Основные расчетные соотношения.....	59
2.2.2 Результаты расчета и их обсуждение.....	63
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ	

РАСХОДА ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ НЕПЛОТНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	69
3.1 Описание экспериментальной установки.....	69
3.2 Методика расчета к.м.с.....	70
3.3 Постановка экспериментов.....	75
3.3.1 Исследование влияния механического экрана в виде козырька.....	75
3.3.2 Исследование влияния механического экрана в виде пластины.....	78
3.3.3 Исследование влияния механического экрана в виде прямого двугранного уголка.....	81
3.3.4 Определение размеров и положения в пространстве механического экрана в виде прямого двугранного уголка.....	85
Выводы по третьей главе.....	91
Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	92
4.1 Численное моделирование отрыва потока на входе в круглый всасывающий патрубок.....	92
4.1.1 Осесимметричная задача в стационарной постановке.....	93
4.1.2 Осесимметричная задача в нестационарной постановке.....	97
4.1.3 Квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке.....	99
4.1.4 Результаты расчета и их обсуждение.....	102
4.2 Моделирование отрыва потока на входе в квадратное всасывающее отверстие в неограниченном пространстве.....	105
4.3 Описание разработанных компьютерных программ.....	111
Выводы по четвертой главе.....	120
Список литературы.....	123
Приложения.....	135
Приложение А – использование результатов диссертационной работы.....	135
Приложение Б - Методы исследования.....	139
Приложение В - Результаты экспериментальных исследований.....	144

Введение

Актуальность избранной темы. Применение систем местной вытяжной вентиляции продолжает оставаться наиболее надежным способом улавливания загрязняющих веществ в технологических процессах различных отраслей промышленности. Главной целью применения систем местной вытяжной вентиляции является эффективное улавливание загрязняющих веществ в местах их образования, доведение концентрации присутствующих в рабочих помещениях выбросов до предельно допустимой при оптимальном объеме отсасываемого воздуха. Энергозатраты на эксплуатацию систем местной вытяжной вентиляции прямо пропорциональны объемам воздуха, удаляемым местными вентиляционными отсосами. Энергосбережение является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Поэтому актуальной задачей является снижение энергозатрат на эксплуатацию систем местной вытяжной вентиляции. Для местных вентиляционных отсосов закрытого типа - различного рода укрытий - снижение энергозатрат возможно за счет снижения объема воздуха, поступающего через неплотности или несанкционированные проемы. В этом случае объем отсасываемого из укрытий воздуха также возможно снизить. Для открытых местных вентиляционных отсосов важной задачей является снижение их аэродинамического сопротивления, что также в конечном итоге сказывается на энергоемкости системы вентиляции. Достичь решения указанных задач возможно за счет использования свойств отрывных потоков. Определение границ отрывной области на входе в открытые местные вентиляционные отсосы позволит найти поверхности профилирования. Использование эффекта отрыва струи на входе неплотности укрытий даст возможность снизить объемы воздуха, поступающего в укрытия. Таким образом, направление исследования диссертационной работы представляется актуальным.

Актуальность данного направления исследований подтверждается грантами, в рамках которых они выполнялись: гранта Президента Российской Федерации НШ-588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газоулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий» (2012 - 2013); гранта Российского фонда

фундаментальных исследований № 12-08-97500-р_центр_а «Разработка методов и алгоритмов компьютерного моделирования, численное и экспериментальное исследование отрывных течений в энергосберегающих системах улавливания загрязняющих веществ» (2012 - 2014); программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова по проекту № А-10/12 «Разработка энергосберегающих систем локализации пылегазовых выделений при производстве строительных материалов» (2012 - 2014); гранта Президента Российской Федерации МК-103.2014.1 «Разработка методов и алгоритмов математического моделирования, численное и экспериментальное исследование двухфазных потоков в системах аспирации» (2014 - 2015).

Степень разработанности темы исследования. В основе теоретического и экспериментального изучения отрывных течений лежат труды таких ученых, как Л.В. Гогиш, Г.Ю. Степанов, П. Чжен, М.И. Гуревич, I. Paraschivoiu, Н.Ф. Краснов, О.Г. Гоман, В.И. Карплюк, М.И. Ништ, С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский, А.И. Желанников.

Из зарубежных ученых к вопросам изучения отрывных течений и турбулентных процессов, их физического и математического описаний и моделирования обращались: J.M. McDonough, R. Mises, Ф. Форхгеймер, J.L. Alden, J.M. Kane.

В промышленной аэродинамике изучению аэродинамических сопротивлений и измерению параметров пылегазовых потоков посвящены работы И.Н. Идельчика, В.И. Ханжонкова, Р.К. Велецкого, Н.Н. Григиной. В промышленной вентиляции отрыв потока изучают на входе во всасывающие отверстия местных вентиляционных установок. Определение границ отрывных областей на входе во всасывающие каналы открытых местных вентиляционных отсосов необходимо для разработки рекомендаций по снижению энергоемкости систем вентиляции. Профилирование вытяжных устройств по найденным границам существенно улучшает акустические свойства местных отсосов и снижает их аэродинамическое сопротивление. Данное направление развивается научной школой профессора В.Н. Посохина.

Для снижения расхода воздуха, поступающего через неплотности, имеет смысл, напротив, повысить аэродинамическое сопротивление входа во всасывающие каналы. Данный подход продемонстрирован в работах И.Н. Логачева, К.И. Логачева, О.А. Аверковой и др.

Цель исследования заключается в выявлении закономерностей отрыва потока на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов, способствующих снижению расхода воздуха, необходимого для эффективного улавливания загрязняющих веществ.

Задачи исследования:

- с использованием стационарных дискретных вихрей разработать и протестировать на адекватность математическую модель срыва потока идеальной несжимаемой жидкости с острых кромок всасывающих щелевидных каналов.
- разработать математическую модель, вычислительный алгоритм и компьютерную программу расчета отрыва потока на входе во всасывающий круглый канал, снабженный механическим кольцевым экраном с выступом. Установить размеры и расположение экранов, способствующих наибольшему сопротивлению входа во всасывающий канал за счет эффекта отрыва струи. Вычислительным и экспериментальным путем выявить связь коэффициента местного сопротивления (далее к.м.с.) с коэффициентом сжатия струи при входе во всасывающий круглый канал.
- разработать лабораторный стенд аспирационного укрытия с неплотностью прямоугольной формы для определения влияния горизонтальных, вертикальных, наклонных и двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в неплотность. Определить возможность снижения объема отсасываемого воздуха.
- разработать программно-алгоритмическую поддержку для расчета осесимметричных и пространственных отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов, позволяющую с достаточной точностью определять поле скоростей, границы отрыва потока и к.м.с. на входе во всасывающее отверстие, моделировать нестационарные течения, исследовать вихревые течения в застойных областях и определять пульсации скорости.

– построить математическую модель отрывного течения на входе в квадратный всасывающий патрубок. Определить поле скоростей на входе во всасывающий канал и поверхность отрыва потока.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Разработаны математические модели отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы, в спектре действия которых могут находиться механические экраны с выступами, позволяющие установить связь между коэффициентом сжатия струи и коэффициентом местного сопротивления;
2. Получена аналитическая зависимость связи коэффициента местного сопротивления и коэффициента сжатия струи для круглого всасывающего канала, экранированного экраном с выступом;
3. Выявлены зависимости изменения коэффициента местного сопротивления от геометрических размеров механических экранов, их формы, расположения и удаленности от всасывающих щелевидных каналов – неплотностей местных вентиляционных отсосов закрытого типа - укрытий;
4. Разработана математическая модель отрыва потока на входе во всасывающие каналы, использующая многоугольные вихревые рамки;
5. Впервые решена задача об отрыве потока на входе в квадратный всасывающий канал с острыми кромками, расположенный в неограниченном пространстве, с использованием разработанной компьютерной программы ;
6. Получена аналитическая зависимость для определения поверхности отрыва на входе в квадратный всасывающий канал.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методов математического моделирования отрывных течений в местных вентиляционных отсосах открытого и закрытого типов, методов повышения их эффективности, в полученных зависимостях отрыва потока на входе во всасывающие каналы.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

- разработаны способы снижения расхода отсасываемого воздуха местными вентиляционными отсосами, необходимого для эффективной локализации выбросов загрязняющих веществ.
- разработана программно-алгоритмическая поддержка для исследования отрыва потока на входе в щелевидные, круглые и квадратные всасывающие каналы.
- результаты исследований используются в учебном процессе при обучении студентов по направлению "Строительство" в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова.

Основная идея работы состоит в использовании явления отрыва потока для разработки эффективных местных вытяжных устройств систем промышленной вентиляции.

Методология и методы исследования. В работе использовались абстрактно-логические, эмпирические, монографические методы, системный подход и математическое моделирование. В ходе диссертационного исследования использовались компьютерное моделирование и натурный эксперимент; метод дискретных вихрей в стационарной и нестационарной постановках, метод Н.Е. Жуковского для отрывного течения идеальной несжимаемой жидкости.

Положения, выносимые на защиту:

- математические модели отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы, в спектре действия которых могут находиться механические экраны с выступами, позволяющие установить связь между коэффициентом сжатия струи и коэффициентом местного сопротивления;
- аналитическая зависимость связи коэффициента местного сопротивления и коэффициента сжатия струи для круглого всасывающего канала, экранированного экраном с выступом;
- зависимости изменения коэффициента местного сопротивления от геометрических размеров механических экранов, их формы, расположения и удаленности от всасывающих щелевидных каналов – неплотностей местных вентиляционных отсосов закрытого типа - укрытий;

- математическая модель отрыва потока на входе во всасывающие каналы, использующую многоугольные вихревые рамки;
- результаты решения задачи об отрыве потока на входе в квадратный всасывающий канал с острыми кромками, расположенный в неограниченном пространстве, с использованием разработанной компьютерной программы ;
- аналитическая зависимость для определения поверхности отрыва на входе в квадратный всасывающий канал.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п.1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», п.3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов обоснована использованием адекватных и достоверных численных методов гидроаэромеханики и подтверждается удовлетворительным согласованием результатов численных расчетов, произведенных разными методами, и результатами натурных экспериментов.

Результаты диссертационного исследования докладывались на Международном симпозиуме «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» (Лазурное, Украина, 2013); International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (Нагоя, Япония, 2014); Международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике» (г. Ростов-на-Дону, 2014г.); Международной научно-практической интернет-конференции «Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие» (Ижевск, 2014), научно-методических семинарах кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им. В.Г. Шухова.

Реализация результатов работы:

- на производстве ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» для проектирования вытяжных каналов и для реконструкции аспирационной системы перегрузки сыпучих материалов на основании разработанных методов математического моделирования для расчета отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов и данных экспериментальных исследований влияния механических экранов на к.м.с. щелевой не плотности.
- в производственном процессе ООО «ЖБИ-Восток» при разработке плана модернизации системы обеспыливающей вентиляции: компьютерные программы были задействованы при проектировании всасывающих каналов; при расчетах к.м.с. всасывающих отверстий использовались эмпирические и аналитические формулы; оборудование всасывающих круглых каналов механическими экранами привело к увеличению разрежения внутри каналов, что позволит установить вентиляторы меньшей мощности.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, из которых 7 в ведущих рецензируемых научных журналах, 5 проиндексированы в Web of Science и Scopus, 2 зарегистрированные компьютерных программы, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, в том числе 88 рисунков, 6 таблиц, список используемой литературы из 108 наименований и 3 приложения.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ НЕПЛОТНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Исследование отрывных течений является одной из фундаментальных и наиболее сложных проблем гидроаэромеханики [1-3]. Этой проблеме посвящены несколько десятков тысяч научных работ. Отметим фундаментальные монографии посвященные экспериментальному [4-6], теоретическому [3,7,8] и численному исследованию [9-11] отрывных течений. Наибольшее внимание научных исследований посвящено отрыву потока при обтекании крыльев самолетов, ракет, кораблей, подводных лодок, ветроустановок, городских застроек и др. объектов.

В промышленной вентиляции отрыв потока изучают на входе во всасывающие отверстия местных вентиляционных установок. Определение границ отрывных областей на входе во всасывающие каналы открытых местных вентиляционных отсосов необходимо для разработки рекомендации по снижению энергоемкости систем вентиляции. Профилирование вытяжных устройств по найденным границам существенно улучшает акустические свойства местных отсосов и снижает их аэродинамическое сопротивление. Данное направление развивается научной школой профессора Посохина В.Н. [12-30].

Для снижения расхода воздуха, поступающего через неплотности, имеет смысл напротив повысить аэродинамическое сопротивление входа во всасывающие каналы. Данный подход продемонстрирован в работах [31-76].

1.1 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с использованием теории функций комплексного переменного

Наиболее плодотворным и традиционным подходом для расчета отрывных потоков воздуха на входе во всасывающие каналы является использование методов теории функций комплексного переменного [7, 12-15, 24, 27, 28, 31-36,

39, 49, 56, 68, 77, 78]: метода конформных отображений, метода Н.Е. Жуковского и других. Такой класс задач относится к нелинейным задачам гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами [77].

В работе [27] решается задача отрыва потока на входе в щелевидный канал с использованием схемы Рябушинского и метода особых точек Чаплыгина [7]. Оригинальным и новым является то, что отрывная зона здесь рассматривается конечной площади, а свободная линия тока замыкается на стенку всасывающего канала (рисунок 1.1). Традиционно свободная линия тока уходит в бесконечность (на рисунке 1.1 она изображена штриховой линией). Было найдено очертание свободной линии тока при разных параметрах отображения (рисунок 1.2).

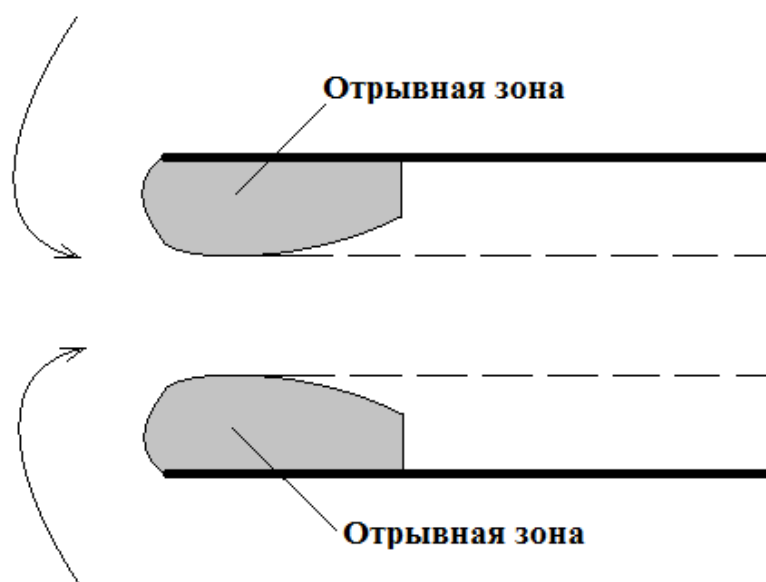


Рисунок 1.1 - Отрыв потока на входе в щелевидный всасывающий канал, расположенный в неограниченном пространстве

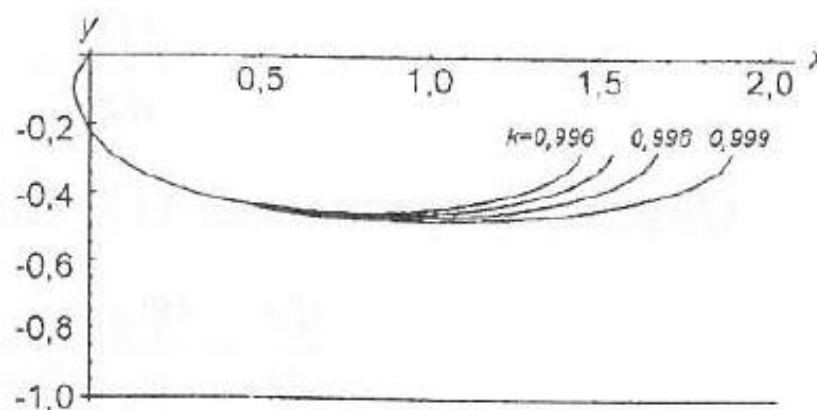


Рисунок 1.2 - Очертание свободной линии тока на входе в щелевидный всасывающий канал, расположенный в неограниченном пространстве

Заметим, что очертание непосредственно на входе в канал не отличается от традиционного. Кроме того, в рамках данного решения остается вопрос об определении скорости на свободной линии тока.

С использованием теории функций комплексного переменного была решена задача о необходимой интенсивности бортового отсоса от промышленной ванны [24, 25]. Были рассмотрены случаи неполного и полного улавливания загрязняющих веществ с учетом конвективного потока, возникающего на поверхности ванны. Для решения задачи использовали теорию двоякопериодических аналитических функций (эллиптических функций), состоящую в том, что любую аналитическую функцию можно выразить через тэта-функцию Якоби [79].

Известно решение задачи об отрыве потока на входе во всасывающие щелевидные зонты - раструбы с использованием функций комплексного переменного [15, 21,23], теории эллиптических функций и численного решения систем нелинейных трансцендентных уравнений с использованием метода половинного деления. Были рассмотрены как короткие зонты - раструбы (с одной вихревой зоной), так и длинные зонты - раструбы (с двумя вихревыми зонами - рисунок 1.3).

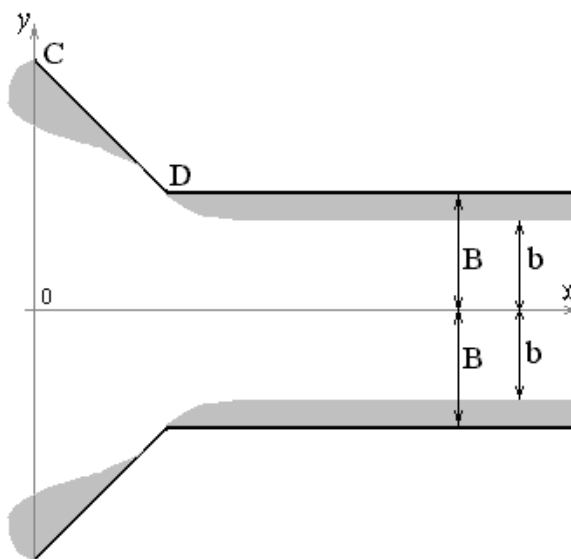


Рисунок 1.3 - Щелевидный зонт-раструб с двумя вихревыми зонами

Были найдены параметры зон отрыва, переход от одной к двум зонам отрыва в зависимости от длины зонта CD , коэффициент сжатия струи b/B .

Главным недостатком методов математического моделирования, построенных с использованием теории функций комплексного переменного, является решение задач только в плоскости и односвязных областях. Но есть и очевидное преимущество - это точное определение границ отрыва, в частности коэффициента сжатия струи, величину которого можно связать с к.м.с. входа во всасывающий канал.

Данное обстоятельство позволило решить ряд задач об отрыве потока на входе во всасывающие каналы, экранированные различными непроницаемыми тонкими телами (козырьками, профилями) [31, 32, 35, 39, 49]. Такие тела будем в дальнейшем называть механическими экранами. Здесь исследовалась возможность увеличения к.м.с. входа во всасывающий канал за счет использования механических экранов. Это важно, как было указано ранее, для проектирования эффективных местных вентиляционных отсосов закрытого типа - аспирационных укрытий. Как, например, указано в монографии [72] основными потребителями электроэнергии в системах аспирации являются вентиляторы или дымососы. Требуемая мощность, потребляемая электродвигателями этих тягодутьевых средств, определяется по формуле

$$N = \frac{Q_a \Delta P_c}{1000 \eta_v \eta_n}, \text{ кВт},$$

где Q_a - общий расход воздуха, удаляемого вентилятором (объемы аспирации), м³/с; ΔP_c - сопротивление аспирационной сети главной магистрали (воздуховодов, пылеуловителей, выбросной трубы), Па; η_v, η_n - к.п.д. вентилятора и передачи.

При снижении объема аспирации, как видно из формулы, будет снижаться мощность электродвигателя. Объемы аспирации представляют сумму объемов воздуха, поступающих через неплотности или несанкционированные проемы аспирационных укрытий и объемов воздуха, эжектируемого потоками сыпучего материала. В данной диссертации рассматриваются вопросы снижения объема воздуха, поступающего через неплотности.

Всасывающая щель с горизонтальным механическим экраном CB рассмотрена в [32] (рисунок 1.4). Данная область течения является моделью щелевой неплотности аспирационного укрытия. Впервые такого рода задача рассматривалась в статье [80], изложенная позднее в монографиях [81, 82]. Были построены линии тока, найдена свободная линии тока, определен коэффициент сжатия струи в зависимости от длины механического экрана.

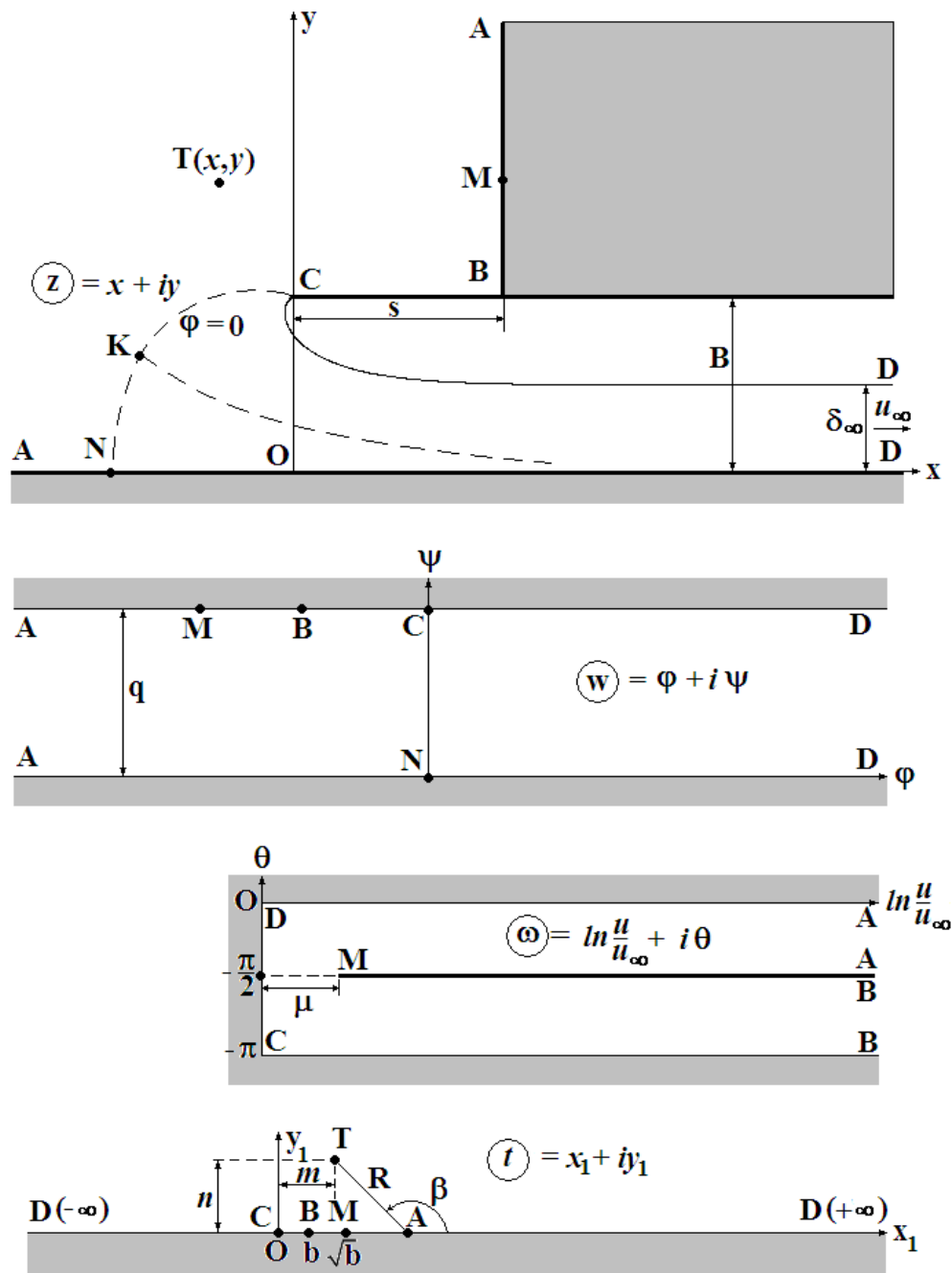


Рисунок 1.4 - Отрывное воздушное течение на входе в щелевидный всасывающий канал с горизонтальным механическим экраном

Был сделан вывод, что длина механического экрана должна быть равна одному калибру (ширине неплотности). Однако взаимосвязь коэффициента сжатия струи и к.м.с. не исследовалась. Не производилось сравнение с экспериментом или данными расчетов, произведенных другими методами. Эти недочеты были устранены в работе [32]. Задача решалась методом Н.Е.Жуковского.

На рисунке 1.1.4 изображены физическая плоскость течения z , область комплексного потенциала $w = \varphi + i\psi$ (φ – потенциал скорости, ψ – функция тока), область функции Жуковского $\omega = \ln(u_0/u) + i\theta$ (u – скорость потока, м/с; u_0 – скорость потока по свободной линии тока CD , м/с; θ – угол между положительным направлением оси OX и направлением вектора скорости $\vec{u}$), параметрическая плоскость t .

Взаимосвязь указанных плоскостей, найденных методом конформных отображений при помощи интеграла Кристоффеля-Шварца определялась следующими соотношениями.

$$w = \frac{q}{\pi} \ln(t-1);$$

$$\omega = \ln \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t-b}} \cdot \frac{\sqrt{t}+1}{\sqrt{t-1}};$$

$$z = \frac{\delta_\infty}{\pi} \int_0^t \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t-b}} \cdot \frac{\sqrt{t}+1}{(t-1)^{3/2}} dt + i;$$

Комплексная скорость имела вид:

$$v \equiv u_x - iu_y = \frac{\sqrt{T-b}}{\sqrt{T} + \sqrt{b}} \cdot \frac{\sqrt{T-1}}{\sqrt{T}+1}.$$

Свободная линия тока определялась с помощью следующей системы:

$$\begin{cases} x_{CD} = \frac{\delta_\infty}{\pi} \int_0^\eta \frac{(v - \sqrt{b}) dv}{\sqrt{b+v}(1+v)^{1.5}}; \\ y_{CD} = 1 - (1 + \sqrt{b}) \frac{\delta_\infty}{\pi} \int_0^\eta \frac{\sqrt{v} dv}{\sqrt{b+v}(1+v)^{1.5}}, \quad 0 \leq \eta < +\infty. \end{cases}$$

В этой работе [32] было найдено поле скоростей, построены линии тока и эквипотенциали в физической плоскости (рисунок 1.4). Было произведено сравнение поля скоростей с экспериментальными данными, а также расчетами, произведенными методами дискретных вихрей и RANS. Сделан вывод об адекватности и достоверности расчетов поля скоростей в большей части спектра всасывания. Была также предпринята попытка связать коэффициент сжатия струи с к.м.с. входа во всасывающий канал. Для этого было введено понятие инерционности потока

$$\Delta u = \frac{u_{\infty}^* - u_{uz}^*}{u_{uz}^*} \equiv \frac{1}{\delta_{\infty}} - 1,$$

которая характеризовала разность скорости на свободной поверхности и средней скорости в щелевидном канале.

Сравнение к.м.с. на входе в плоскую трубу и диафрагму и инерционности потока позволило сделать вывод, что характер его роста при увеличении длины выступа коррелируется с изменением к.м.с.

В работе [31] методом Н.Е.Жуковского рассмотрено течение вблизи всасывающего щелевидного канала, встроенного в плоскую непроницаемую стенку, в зависимости от механического экрана, установленного перпендикулярно оси всасывания. Соответствие физической плоскости течения для этой задачи изображено на рисунке 1.5. Здесь основой для решения задачи были получены следующие формулы:

$$w = (1-k) \frac{q}{\pi} \ln \left(\frac{t_1 - m}{m} \right) + k \frac{q}{\pi} \ln(t_1 - 1);$$

$$\omega = -\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sqrt{t_1} - \sqrt{p}}{\sqrt{t_1} + \sqrt{p}} \right) = \ln \left(\frac{\sqrt{t_1} + \sqrt{p}}{\sqrt{t_1} - p} \right);$$

$$z = i + (1-k) \frac{\delta_{\infty}}{\pi} N_m + k \frac{\delta_{\infty}}{\pi} N_1;$$

$$k = \frac{1-h}{1-m}; \quad N_m = \int_0^t \frac{\sqrt{t_1} + \sqrt{p}}{\sqrt{t_1} - p} \frac{dt_1}{t_1 - m}; \quad N_1 = \int_0^t \frac{\sqrt{t_1} + \sqrt{p}}{\sqrt{t_1} - p} \frac{dt_1}{t_1 - 1},$$

$$v \equiv u_x - iu_y = u_0 e^{-\omega(t_1)} = u_0 \frac{\sqrt{t-p}}{\sqrt{t} + \sqrt{p}}.$$

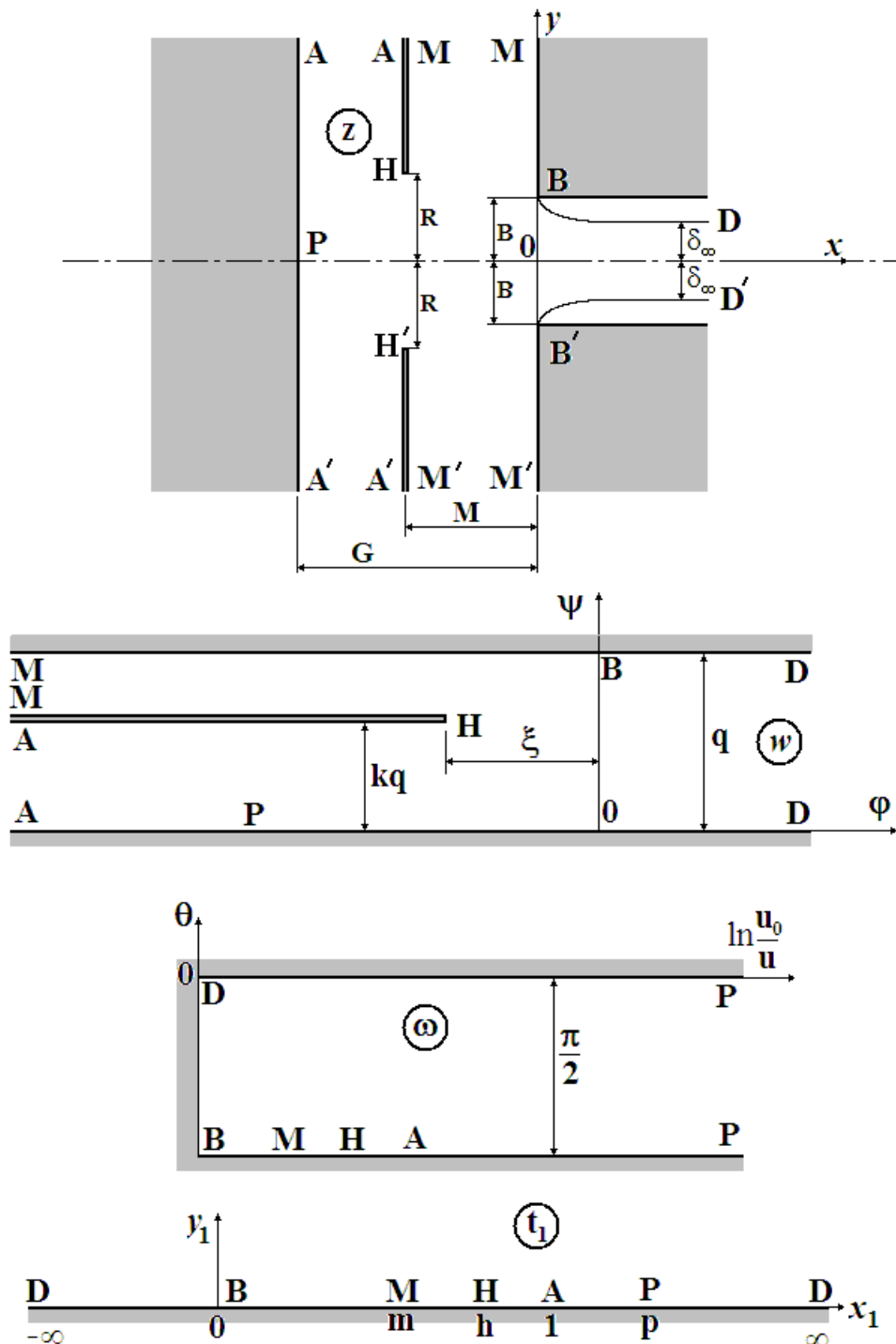


Рисунок 1.5 - Соответствие физической плоскости течения задаче об отрыве потока на входе во всасывающий канал с двумя механическими экранами

Здесь в качестве приближения к.м.с. использовался критерий кинетичности потока:

$$\Delta u^2 = \left(\frac{1}{\delta_\infty} - 1 \right)^2.$$

Был сделан вывод, что оснащение щелевидного всасывающего канала механическим экраном с отверстием, равным ширине этого канала, усиливает эффект поджатия струи. При установке механического экрана на расстоянии 0,2..0,4 полувисоты щелевидного канала такой эффект будет максимальным. При приближении второго непроницаемого механического экрана поджатие струи возрастает, увеличивается величина к.м.с. при входе всасываемого потока в щелевидный канал.

Моделирование отрывного течения воздуха при входе в щелевидный канал с козырьком и непроницаемым механическим экраном было впервые рассмотрено в статье [49] (рисунок 1.6).

Здесь основные соотношения имели следующий вид.

$$w = \frac{q}{\pi} \ln(t-1);$$

$$\omega = \ln \left(\frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t-b}} \cdot \frac{\sqrt{t} + \sqrt{p}}{\sqrt{t-p}} \right);$$

$$z = \frac{\delta}{q} \int_0^t e^{\omega} \frac{dw}{dt} dt = i + \frac{\delta}{\pi} \int_0^t \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t-b}} \frac{\sqrt{t} + \sqrt{p}}{\sqrt{t-p}} \frac{dt}{t-1};$$

Выражение для координат точек свободной линии тока CD:

$$x_{CD} = \frac{\delta}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{x_1 + m}{\sqrt{b-x_1} \sqrt{p-x_1}} \frac{dx_1}{1-x_1}; \quad y_{CD} = 1 + \frac{\delta}{\pi} (\sqrt{p} + \sqrt{b}) \cdot \int_0^{x_1} \frac{\sqrt{-x_1}}{\sqrt{b-x_1} \sqrt{p-x_1}} \frac{dx_1}{1-x_1}.$$

Критерий кинетичности потока использовался такой же, как и в предыдущей работе [31]. Было произведено сравнение изменения этого коэффициента с экспериментальными данными ЦАГИ, которые были получены И.Е. Идельчиком [83] и В.И. Ханжонковым [84]. Сделан вывод, что изменение коэффициента инерционности струи удовлетворительно согласуется с изменением экспериментального к.м.с. при входе воздушного потока в плоский канал и круглую трубу в зависимости от удаления механического экрана.

Показано, что минимальная толщина струи при $S = 0.5$ и $G = 0.5$ (рисунок 1.6) уменьшается в 1.75 раза по сравнению с отсутствием механического экрана, а при $G = 5$ и $S = 0.5$ – на 16.8% по сравнению с отсутствием горизонтального механического экрана ($S = 0$).

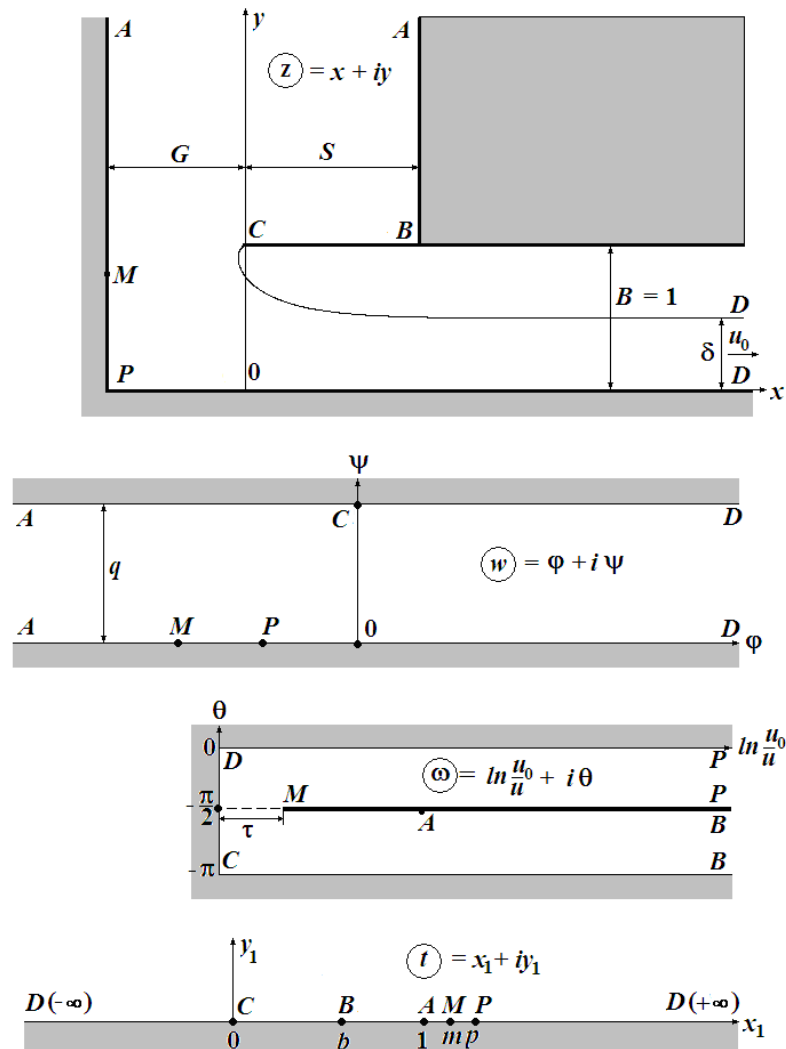


Рисунок 1.6 - К задаче отрывного течения в щелевидном канале с непроницаемым экраном

Искомая скорость воздуха в точке $z(t)$ определялась из соотношения:

$$\frac{dw}{dz} \equiv u_x - iu_y = \frac{dw}{dt} \bigg/ \frac{dz}{dt} = u_0 \frac{\sqrt{t-b}\sqrt{t-p}}{(\sqrt{t} + \sqrt{b})(\sqrt{t} + \sqrt{p})}.$$

Объединяющий случай наличия проницаемых, непроницаемых, горизонтальных механических экранов был впервые рассмотрен в работе [35] (рисунок 1.7). Полученные с использованием метода Н.Е.Жуковского расчетные соотношения имели следующий вид:

$$\omega = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t} - \sqrt{b}} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{t} + \sqrt{p}}{\sqrt{t} - \sqrt{p}}, \quad e^\omega = \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t} - \sqrt{b}} \cdot \frac{\sqrt{t} + \sqrt{p}}{\sqrt{t} - \sqrt{p}},$$

$$w = (1-k) \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{t-m}{m} \right) + k \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \ln(t-1), \quad k = \frac{1-h}{1-m},$$

$$z = i + \frac{\delta_\infty}{\pi} \left\{ a_1 + (\sqrt{p} + \sqrt{b}) a_3 + (1-k) \left[(m + \sqrt{b}\sqrt{p}) a_2 + m(\sqrt{p} + \sqrt{b}) a_4 \right] + \right. \\ \left. + k \left[(1 + \sqrt{b}\sqrt{p}) b_2 + (\sqrt{p} + \sqrt{b}) b_4 \right] \right\},$$

$$a_1 = \int_0^t f_1 dt; \quad a_2 = \int_0^t f_1 \frac{dt}{t-m}; \quad a_3 = \int_0^t f_1 \frac{dt}{\sqrt{t}}; \quad a_4 = \int_0^t f_1 \frac{dt}{\sqrt{t}(t-m)};$$

$$b_2 = \int_0^t f_1 \frac{dt}{t-1}; \quad b_4 = \int_0^t f_1 \frac{dt}{\sqrt{t}(t-1)}; \quad f_1 = \frac{1}{\sqrt{t-b}\sqrt{t-p}}.$$

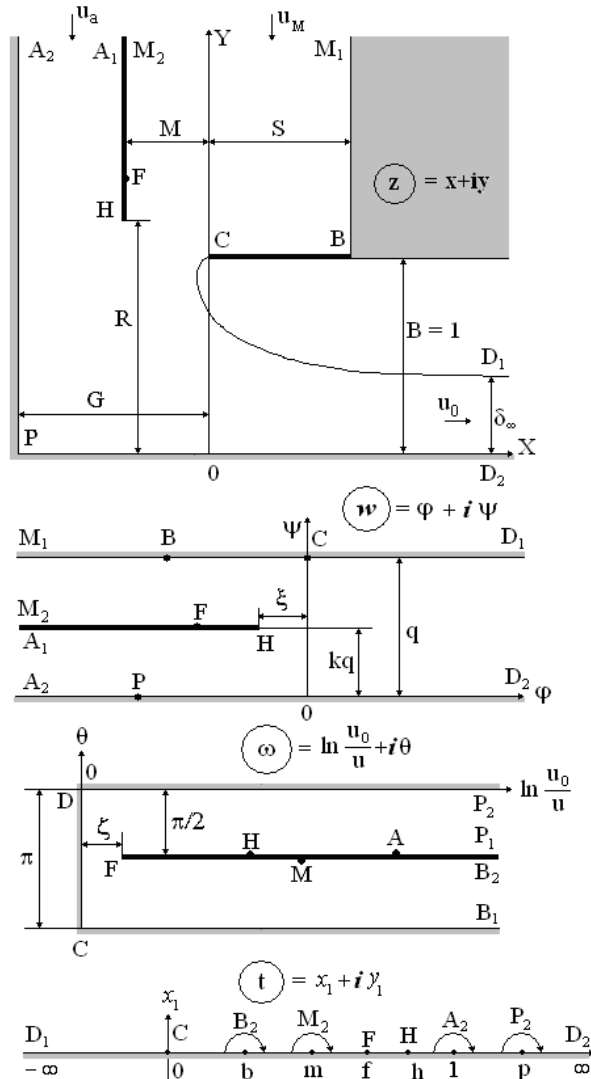


Рисунок 1.7 - Отрывное течение на входе в щелевидный канал с механическими экранами

Параметрическое уравнение для определения свободной линии тока:

$$x_{CD} = \operatorname{Re} z_{CD} = \frac{\delta_{\infty}}{\pi} \left[a_1 + (1-k)(m + \sqrt{b})a_2 + k(1 + \sqrt{b})b_2 \right];$$

$$y_{CD} = \operatorname{Im} z_{CD} = 1 + \frac{\delta_{\infty}}{\pi} (\sqrt{p} + \sqrt{b}) [a_3 + (1-k)ma_4 + kb_4].$$

Указано, что величина δ_{∞} оказывает существенное влияние на величину к.м.с. входа воздуха в отсасывающее отверстие, что связано с влиянием на сопротивление эффекта Борда-Карно: при сужении потока, а затем после последующего расширения потери давления инициируются неупругим «ударом» быстрого воздушного потока с медленным. Здесь использовалась предложенная И.Е. Идельчик в работе [85] зависимость к.м.с. от толщины сжатой струи:

$$\zeta_{Bo} = \left(\frac{1}{\delta_{\infty}} - 1 \right)^2.$$

В рассмотренной ранее работе [31] этот коэффициент назывался коэффициентом инерционности или критерием кинетичности.

Экранирование щелевидного всасывающего канала, снабженного горизонтальным механическим экраном, при размещении вертикального механического экрана с центральным отверстием на расстоянии $M = 0,25 - 0,75$ инициирует увеличение к.м.с. входа воздуха. Заметен минимум в этом диапазоне ($M \approx 0,6$). При наличии отверстия в вертикальном механическом экране ($R=1$, $M=0,75$, $S=0,5$, $G \geq 10$) коэффициент сжатия струи уменьшается на 21% , к.м.с. увеличивается в 2,75 раза, а расход воздуха в щелевидном канале уменьшается почти на 40% в сравнении с каналом без экранов ($R \rightarrow \infty$, $G \geq 10$, $S=0$).

1.2 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с использованием метода дискретных вихрей

В авиационной технике представляет интерес исследовать отрывные течения на входе в круглые или щелевидные воздухозаборники [86]. По геометрии такие течения аналогичны отрывным потокам на входе во

всасывающие каналы. В работах [87,88] (результаты этих работ изложены в известной монографии [89]) рассматриваются турбулентные течения на входе в плоские и цилиндрические каналы. Определяются турбулентные характеристики течения. В данных задачах поток набегает на плоский или круглый всасывающий канал, в отличие от задач, когда воздух покоится на бесконечности и происходит всасывание внутри каналов. В работе [87] исследование проводилось с использованием метода дискретных вихрей в нестационарной постановке и конформных отображений. Использование последнего дало возможность достичь точного выполнения граничных условий. Заметим, что такой подход возможен для класса задач, где возможно использование конформных отображений - для плоских односвязных областей.

Расчет течения на входе в круглый всасывающий патрубок был произведен в работе [18]. Здесь использовался метод дискретных вихрей в стационарной и нестационарной постановках. Была построена свободная линия тока. Был сделан вывод, что использование нестационарных дискретных вихрей позволяет достичь большей точности по сравнению с экспериментом, чем стационарных. Однако выбор первых свободных вихрей был произведен некорректно. Это недостаток был устранен в работах [35, 36, 42, 43, 45, 46, 68, 70, 71].

Метод дискретных вихрей в нестационарной постановке использовался для расчета течений в спектрах действия вытяжных каналов в работах [17-20, 33, 35, 38, 40, 44, 47, 51, 54] и др. Были рассчитаны отрывные течения на входе в щелевидные и круглый отсосы-раструбы; вблизи бокового отсоса над прямым двухгранным углом; в спектре действия круглого отсоса-раструба, экранированного приточной кольцевой струей; в замкнутом помещении при действии приточного и вытяжного отверстий; в полуограниченном пространстве с разрезами и др. Метод дискретных вихрей в нестационарной постановке дает возможность исследовать изменения поля скоростей и развитие вихревой структуры во времени, определять усредненные характеристики течения.

Для расчета течения на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий метод дискретных вихрей в нестационарной постановке использовался в

работах [35, 50, 54]. Вначале геометрия щелевой неплотности существенно упрощалась. Граница аспирационного укрытия заменялась круглой трубой с радиусом $R \gg h$ (рисунок 1.8). Скорость всасывания v_0 задавалась на конечном расстоянии от входа в канал. Из торца механического экрана была предусмотрена возможность истечения приточной струи со скоростью v_{Π} .

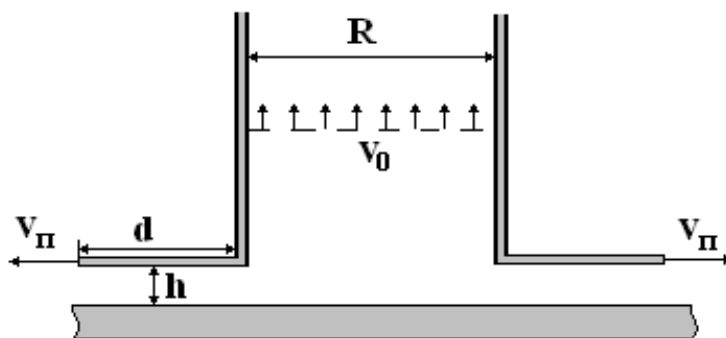


Рисунок 1.8 - Круглая труба над непроницаемой плоскостью

Было найдено поле скоростей при входе в щелевидную неплотность и вычислен коэффициент Кориолиса, который выражает неравномерность распределения поля скоростей. Была найдена величина длины козырька, при которой коэффициент Кориолиса достигает наибольшего значения. При истечении из торца величина этого коэффициента повышается (рисунок 1.9).

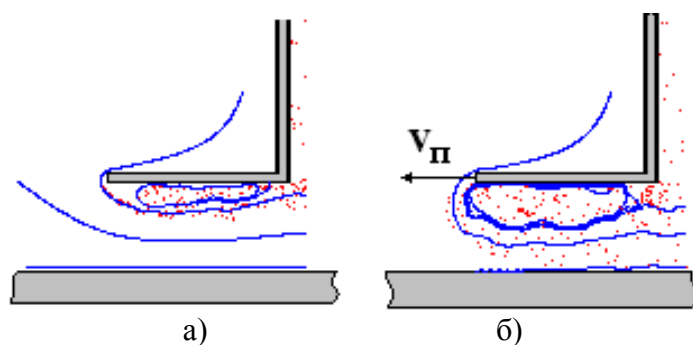


Рисунок 1.9 - Линии тока и распределение нестационарных дискретных вихрей при входе в неплотность: а) при $v_{\Pi} = 0$; б) при $v_{\Pi} > 0$

Заметим, что использование приточной струи является очень "тонкой", трудноосуществимой и энергозатратной технологией.

Далее в работе [50] рассматривалась плоская задача и учтена геометрия границ аспирационного укрытия (рисунок 1.10).

Вычислительный алгоритм расчета строился следующим образом. Предполагалось, что граница области имеет z линий. Дискретизация осуществляется присоединенными вихрями и контрольными точками. На острых кромках и располагались вихри. По центру между двумя соседними присоединенными вихрями располагались контрольные точки. В этом случае было N присоединенных вихрей и $N-z$ контрольных точек.

В момент времени $t = +0$, включалось всасывающее отверстие. В области находились только присоединенные вихри.

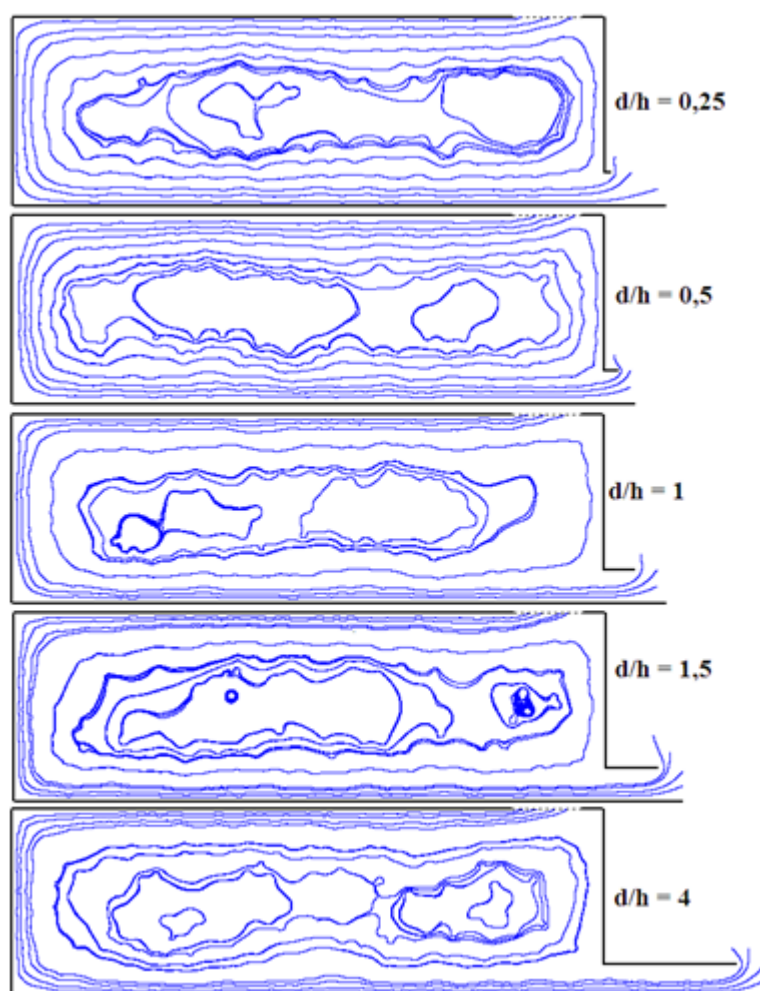


Рисунок 1.10 - Отрывное течение на входе в щелевидную неплотность и вихреобразования в аспирационном укрытии при различных длинах механического экрана

Их влияние на контрольную точку x^p вдоль единичного вектора внешней нормали к границе определялось из выражения:

$$v_n(x^p) = \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k), \quad (1.1)$$

где

$$G(x^p, \xi^k) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2]};$$

(x_1, x_2) - координаты расчетной точки x^p ; (ξ_1, ξ_2) - координаты расположения присоединенного вихря, имеющего циркуляцию $\Gamma(\xi^k)$, находящегося в точке ξ^k ; $\vec{n} \{n_1, n_2\}$ - орта вектора внешней нормали к границе; $v_n(x^p)$ - скорость в расчетной точке x^p вдоль $\vec{n}$, заданная при постановке задачи.

При изменении p от 1 до $N-z$ получалась система $N-z$ уравнений с N неизвестными величинами циркуляций $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$. Для замыкания системы уравнений добавлялось условие Томпсона – неизменности циркуляции по контуру, который охватывает профиль и след (сумма всех циркуляций присоединенных вихрей, которые расположены на этом контуре и свободных вихрей, сходящих с него, равняется нулю). В этом случае система линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных циркуляций присоединенных вихрей имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-z}, \\ \sum_{k=1+n_{c-1}}^{n_c} \Gamma(\xi^k) = 0, & c = \overline{1, z}. \end{cases}$$

Здесь $\sum_{c=1}^z n_c = N$; $n_0 = 0$; n_c - количество вихрей на c -й линии.

После решения данной системы определяется скорость в заданной точке из выражения (1.1).

В следующий момент времени $t = 1 \cdot \Delta t$ происходил срыв L свободных вихрей с L острых кромок по направлению скорости воздушного потока. Их новое положение определялось из старого по следующим формулам:

$$x' = x + v_x \Delta t, \quad y' = y + v_y \Delta t,$$

где v_x, v_y - составляющие скорости воздушного потока, вычисляемые с помощью формулы (1.1). В этот момент времени неизвестные циркуляции присоединенных вихрей определялись из системы следующих уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{l=1}^L G(x^p, \varsigma^l) \gamma(\varsigma^l) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-z}, \\ \sum_{k=1+n_{c-1}}^{n_c} \Gamma(\xi^k) + \sum_{l=1+L_{c-1}}^{L_c} \gamma(\varsigma^l) = 0, & c = \overline{1, z}, \end{cases} \quad (1.2)$$

где ς^l - точка, где находился свободный вихрь, сорвавшийся с l -й острой кромки,

L_c - количество точек срыва вихрей с линии c ; $\sum_{c=1}^z L_c = L$; $L_0 = 0$.

В последующий момент времени сходили еще L свободных вихрей, "старые" вихри приобретали свои новые положения.

В следующий момент времени $t = 2 \cdot \Delta t$ система уравнений (1.2) преобразовывалась к виду:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^2 \sum_{l=1}^L G(x^p, \varsigma^{l\tau}) \gamma(\varsigma^{l\tau}) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-z}, \\ \sum_{k=1+n_{c-1}}^{n_c} \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^2 \sum_{l=1+L_{c-1}}^{L_c} \gamma(\varsigma^{l\tau}) = 0, & c = \overline{1, z}, \end{cases}$$

где $\varsigma^{l\tau}$ - точка нахождения свободного вихря, сошедшего в момент времени τ с l -й острой кромки; $\gamma(\varsigma^{l\tau})$ - его циркуляция.

В любой момент времени $t = m \cdot \Delta t$ система линейных уравнений для определения искомых циркуляций присоединенных вихрей имели следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x^p, \varsigma^{l\tau}) \gamma(\varsigma^{l\tau}) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-z}, \\ \sum_{k=1+n_{c-1}}^{n_c} \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1+L_{c-1}}^{L_c} \gamma(\varsigma^{l\tau}) = 0, & c = \overline{1, z}, \end{cases}$$

а искомая скорость в заданной точке определялась с помощью формулы:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G(x, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x, \varsigma^{l\tau}) \gamma(\varsigma^{l\tau}).$$

На основе приведенных расчетных соотношений была разработана компьютерная программа и был произведен расчет отрыва потока на входе в щелевую неплотность (рисунок 1.11)

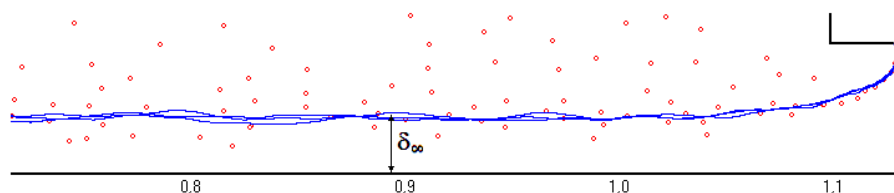


Рисунок 1.11 - Линии тока при отрыве потока на входе в щелевидную неплотность

Коэффициент сжатия струи δ_∞/h колебался в пределах 0,5 – 0,58 и не зависел от длины механического экрана (рисунок 1.11). Здесь вновь была найдена зависимость коэффициента Кориолиса от длины механического экрана и сделан вывод, что его длина не должна превосходить одного калибра. Был произведен расчет течения при расположении в спектре действия щелевидной неплотности дополнительных механических экранов (рисунок 1.12).

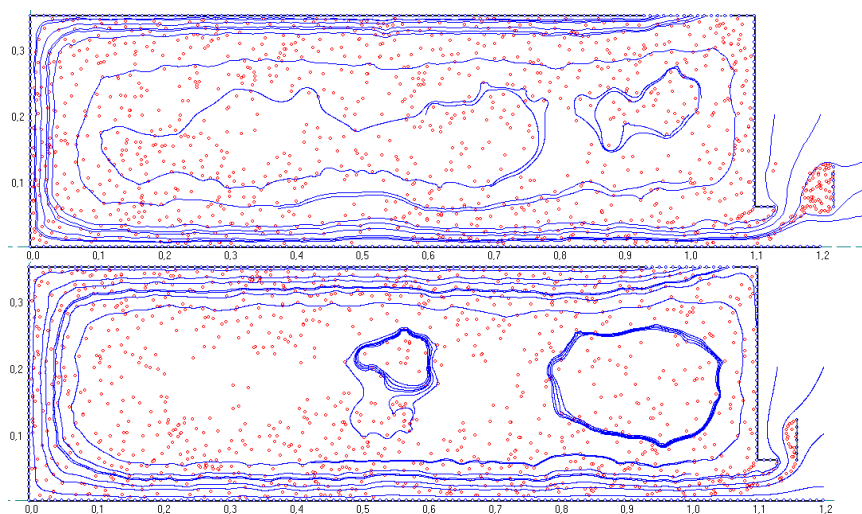


Рисунок 1.12. Линии тока и вихри в укрытии со щелевой неплотностью с двумя механическими экранами

Однако не удалось выявить влияние длины второго механического экрана и взаимосвязь коэффициента сжатия струи с к.м.с. входа в щелевидную неплотность.

Поэтому далее была предпринята попытка разработки метода математического моделирования отрыва потока на входе во всасывающие каналы

с использованием стационарных дискретных вихрей [35, 36, 42, 43, 45, 46, 68, 70, 71].

Вначале решалась задача об отрыве потока на входе в щелевидный всасывающий канал с горизонтальным механическим экраном (рисунок 1.13).

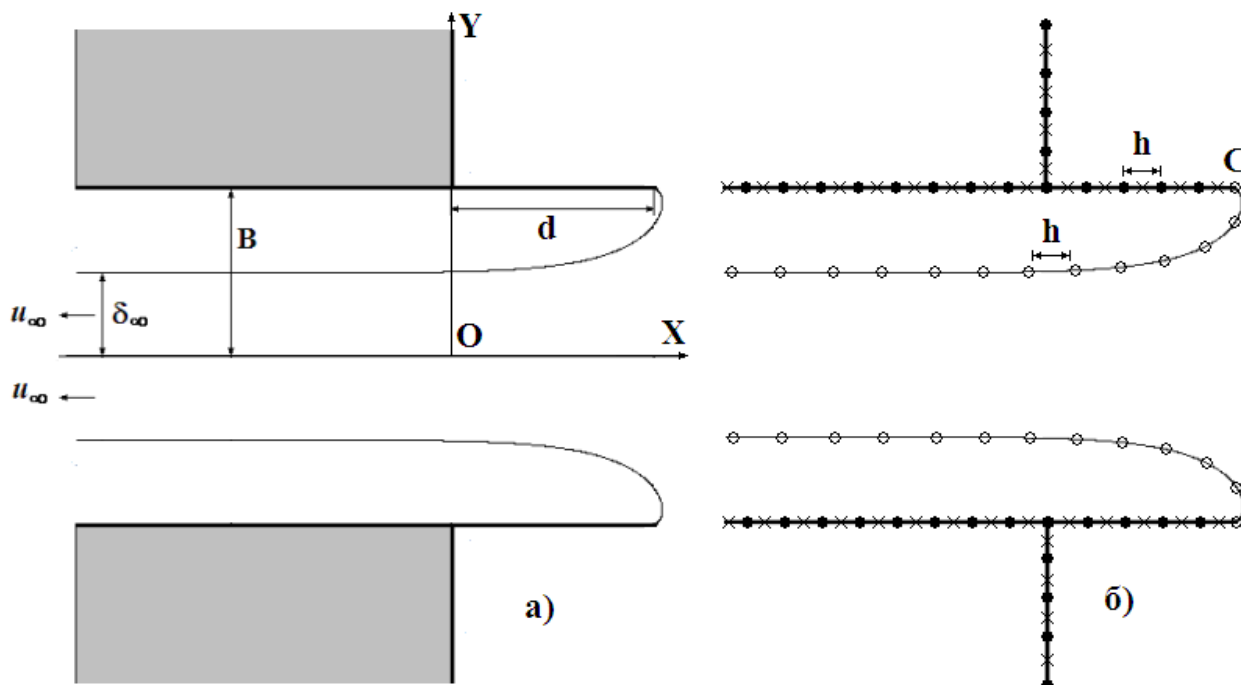


Рисунок 1.13 - Отрыв потока на входе в выступающий щелевидный канал:

а) область течения; б) дискретизация границ течения

($\odot$ – свободные вихри, $\bullet$ – присоединенные вихри, $\times$ – контрольные точки)

Дискретная математическая модель и итерационная процедура определения свободной линии тока строились следующим образом.

Были введены обозначения: N – количество присоединенных вихрей верхней части границы; N_s – количество свободных вихрей. Вихрь на острой кромке C козырька считался свободным. Точка $x^p(x_1, x_2)$ – контрольная точка; $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка расположения присоединенного вихря с циркуляцией $\Gamma(\xi^k)$; $v_n(x^p)$ – скорость в точке x^p вдоль орта $\vec{n}$; $\Gamma(\xi^k) = -\Gamma(\xi^{k+N})$, где $k = \overline{1, N}$.

На неизвестной заранее свободной линии тока циркуляция свободных вихрей считалась постоянной и равна γ . Первое приближение для искомой свободной линии тока задавалось в виде полуполосы, уходящей на 10 калибров внутрь щелевидного канала. Воздействие всех присоединенных и свободных

вихрей на контрольную точку x^p вдоль орта внешней нормали определялось из выражения:

$$\begin{aligned} v_n(x^p) &= \sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) - \sum_{q=N+1}^{2N} G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^{q-N}) + \\ &+ \gamma \sum_{k=1}^{N_S} G(x^p, \zeta^k) - \gamma \sum_{k=N_S+1}^{2N_S} G(x^p, \zeta^k) = \\ &= \sum_{q=1}^N (G(x^p, \xi^q) - G(x^p, \xi^{q+N})) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_S} (G(x^p, \zeta^k) - G(x^p, \zeta^{k+N_S})), \end{aligned}$$

где ζ^k – положение свободного вихря.

Так как $v_n(x^p) = 0$, это выражение преобразовывалось к виду:

$$\sum_{q=1}^N (G(x^p, \xi^q) - G(x^p, \xi^{q+N})) \Gamma(\xi^q) = -\gamma \sum_{k=1}^{N_S} (G(x^p, \zeta^k) - G(x^p, \zeta^{k+N_S})). \quad (1.3)$$

Изменением p от 1 до N была получена система линейных алгебраических уравнений с неизвестными циркуляциями $\Gamma(\xi^1), \Gamma(\xi^2), \dots, \Gamma(\xi^N)$, после решения которой скорость в произвольной точке определялась из формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N (G(x, \xi^q) - G(x, \xi^{q+N})) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_S} (G(x, \zeta^k) - G(x, \zeta^{k+N_S})),$$

после чего строилось второе приближение для свободной линии тока с использованием формул: $x = x' + v_x \Delta t$, $y = y' + v_y \Delta t$, где Δt – шаг во времени.

Найденные свободные вихри располагались на свободной линии тока с шагом дискретности h . После второй итерации для свободной линии снова решалась система уравнений (1.3) и определялись неизвестные циркуляции присоединенных вихрей. Точно также производились следующие итерации, пока разница между предыдущим и последующим положениями свободной линии тока не становилась меньше заданной точности.

Сравнение расчетных и экспериментальных безразмерных профилей скорости $(u_x/u_\infty; u_y/u_\infty)$ и свободной линии тока показано на рисунке 1.14а и 1.14б.

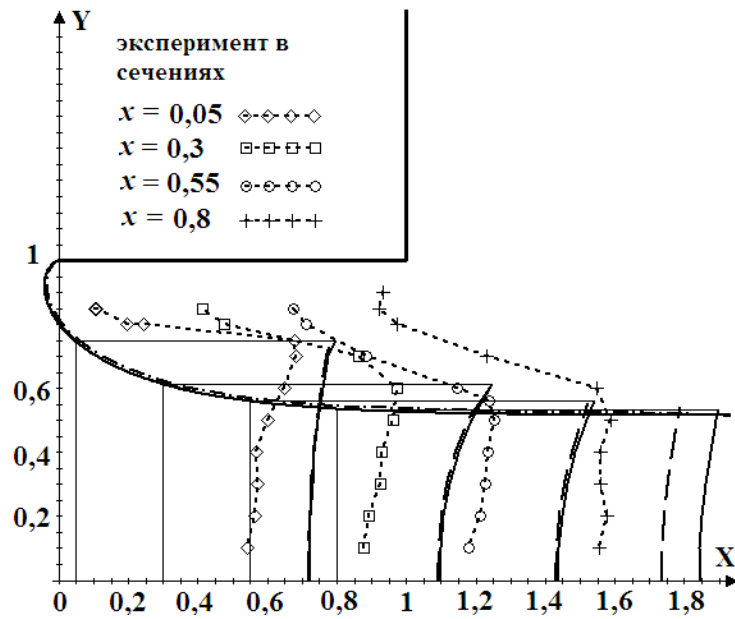


Рисунок 1.14а - Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Профили горизонтальной составляющей скорости

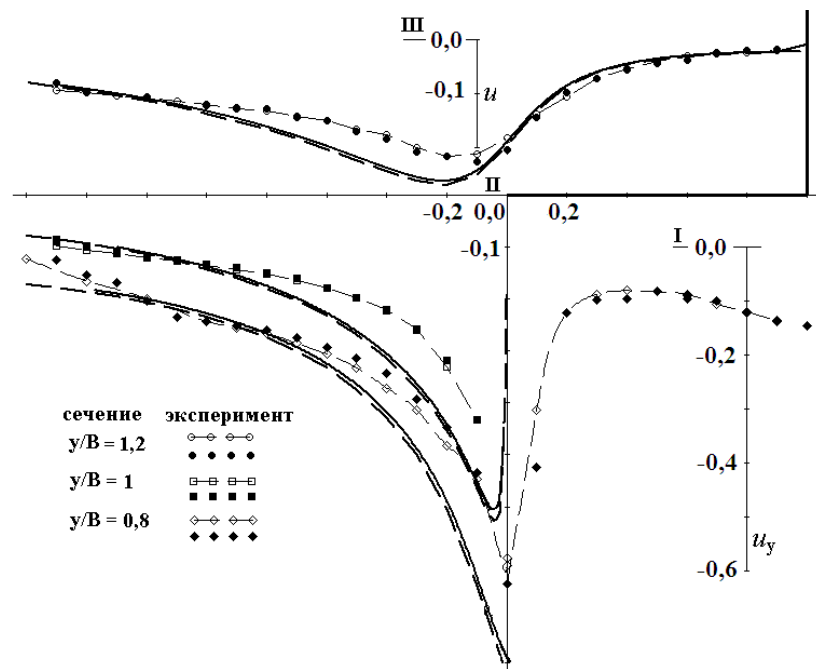


Рисунок 1.14б - Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Профили вертикальной составляющей скорости

Здесь сплошные линии - расчеты по методу Н.Е.Жуковского, пунктирные и штрихпунктирные линии – расчеты по методу дискретных вихрей в стационарной постановке. Величины скорости и положения свободной линии тока практически совпадают. Наибольшее расхождение в 2% относительно расчетов по методу Н.Е.Жуковского для горизонтальной составляющей скорости наблюдается в сечении $x = 0.8$.

Далее в расчетную область был добавлен тонкий механический экран (рисунок 1.15). В этом случае возник ряд трудностей, поскольку существует несколько режимов обтекания такого механического экрана: бесциркуляционное (на обеих острых кромках механического экрана располагаются присоединенные вихри), циркуляционное с условием конечности скорости на нижней или верхней кромке (на одном конце механического экрана располагается контрольная точка, а на другом вихрь), безударное (на концах механического экрана располагаются контрольные точки). Как показали вычислительные и натурные эксперименты наиболее близка к эксперименту схема течения с циркуляционным обтеканием механического экрана с условием конечности скорости на острой кромке ближайшей ко всасывающему каналу (рисунок 1.15).

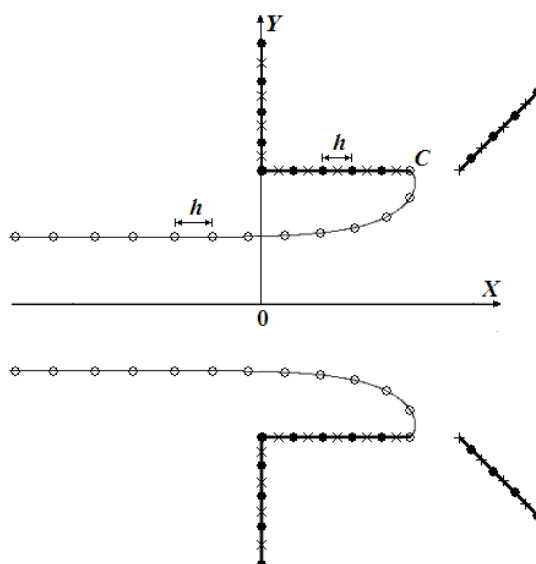


Рисунок 1.15 - Дискретизация границ с добавлением тонкого механического экрана внутрь области течения (• – присоединенные вихри, × – контрольные точки, ◊ – свободные вихри)

Были произведены расчеты коэффициента сжатия струи для разных длин механических экранов. К.м.с. вычислялся с помощью формул: $\zeta = (1/\delta_\infty - 1)^2$ для щелевидного всасывающего канала и $\zeta = (1 - 1/\delta_\infty^2)^2$ для круглого всасывающего канала, которые следуют из формул Борда-Карно.

Рассматривался вертикальный механический экран (рисунок 1.16). Расчет зафиксировал минимум величины коэффициента сжатия струи при удалении вертикального механического экрана от входа во всасывающий канал

(рисунок 1.17). Для круглой трубы такой минимум наблюдается при $r \approx 0,3 \div 0,4$, а для щелевидного канала при $r \approx 0,6 \div 0,7$. Данное явление подтверждено натурным экспериментом (рисунок 1.18). Однако при использовании механического экрана с выступом наблюдалось существенное различие с данными натурального эксперимента (рисунок 1.19).

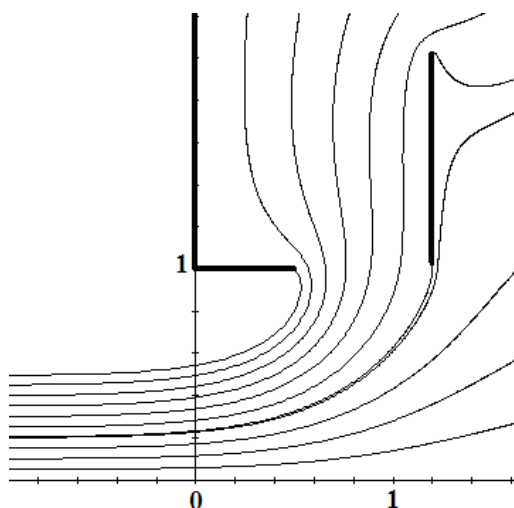


Рисунок 1.16 - Течение на входе в канал с механическими экранами

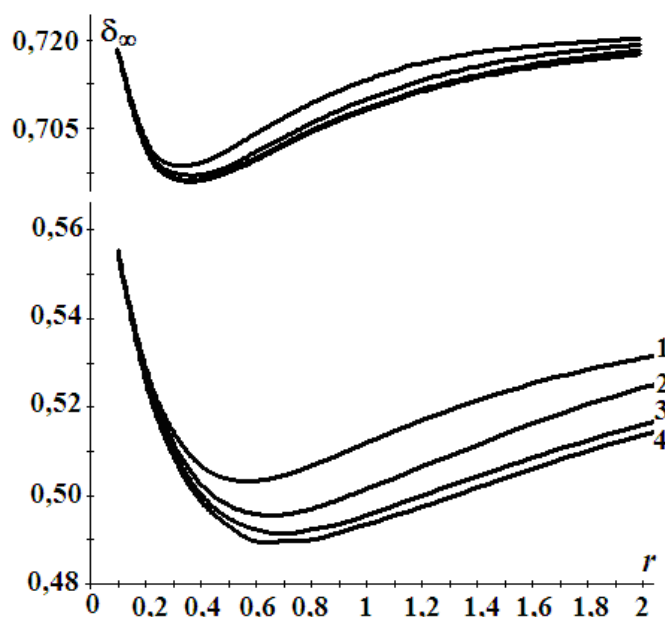


Рисунок 1.17 - Изменение коэффициента сжатия струи от удаления r вертикального механического экрана от входа во всасывающий канал при разной его длине: 1— $d_0=0,5$; 2— $d_0=1$; 3— $d_0=2$; 4— $d_0=10$

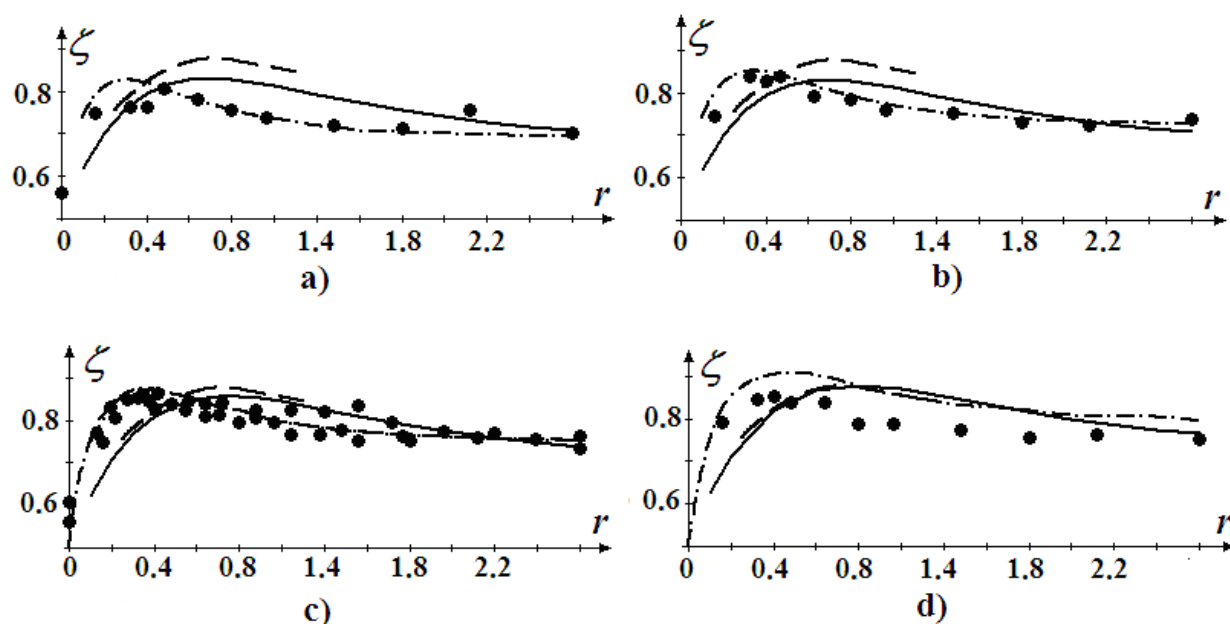


Рисунок 1.18 - Сравнение величин к.м.с. ζ от удаления r , полученных методом Н.Е.Жуковского (— —), методом дискретных прямолинейных вихрей (---), методом кольцевых вихрей (- · - · -) и экспериментально (• •) при $d_0 = 1.55$: а) $d = 0.24$; б) $d = 0.48$; в) $d = 0.56$; д) $d = 1.2$

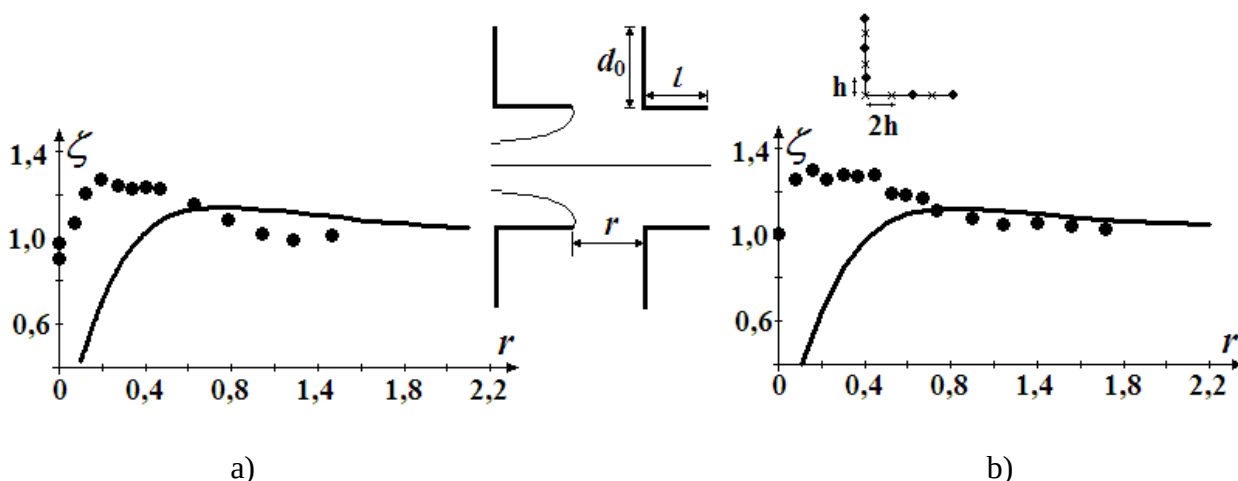


Рисунок 1.19 - Изменение к.м.с. входа воздуха в круглую трубу с механическим экраном (линия - численный эксперимент; • • - натурный эксперимент): а) $l = 0.59$; б) $l = 0.96$

1.3 Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы с учетом сил вязкости

Вязкий отрыв потока на входе в пробоотборники щелевидной и круглой формы рассмотрен в работах [90-93]. Здесь под аспирацией понимается отбор проб аэрозольных частиц в отличие от аспирации как науки об улавливании пылевых аэрозолей местными вентиляционными отсосами разных типов с

последующей очисткой запыленного воздуха в пылеулавливающих аппаратах [94].

Несущая среда в работе [93] описывается двумерными уравнениями Навье-Стокса в приближении стационарного вязкого ламинарного течения несжимаемого газа (рисунок 1.20).

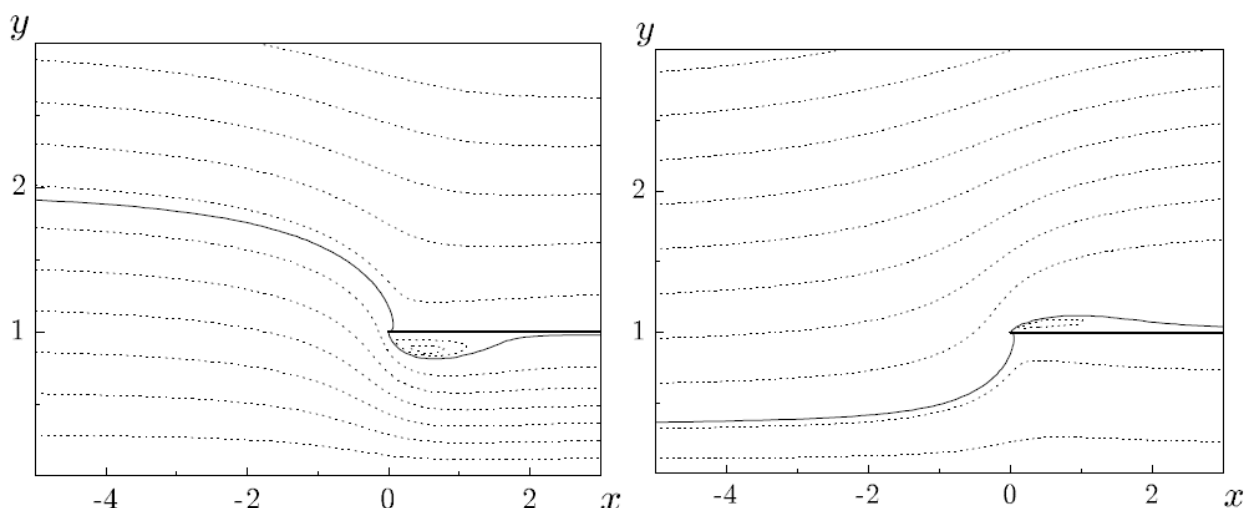


Рисунок 1.20 - Линии тока на входе в щелевой пробоотборник

Данные уравнения с учетом граничных условий решались на основе алгоритма SIMPLE методом конечных объемов в среде пакета FLUENT. Была рассмотрена и осесимметричная задача: отрывное течение на входе в тонкостенную трубу. Были рассмотрены две модели: потенциальная и вязкая. Потенциальная модель была построена с использованием дискретных присоединенных вихрей, сход свободных вихрей рассмотрен не был. Во второй модели несущая среда рассматривалась в приближении осесимметричного ламинарного течения несжимаемого газа и описывалась двумерными уравнениями Навье-Стокса (рисунок 1.21).

С использованием программы FLUENT было проведено исследование отрывного течения на входе в щелевидное всасывающее отверстие [26] (рисунок 1.22).

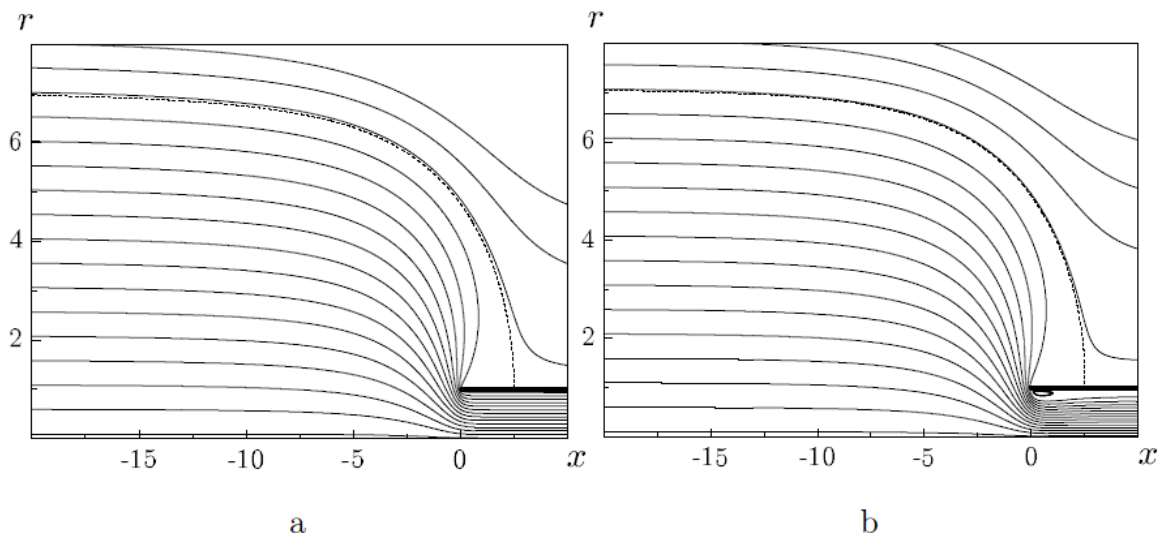


Рисунок 1.21 - Картина линий тока для потенциальной модели (а)
и вязкой модели (б)

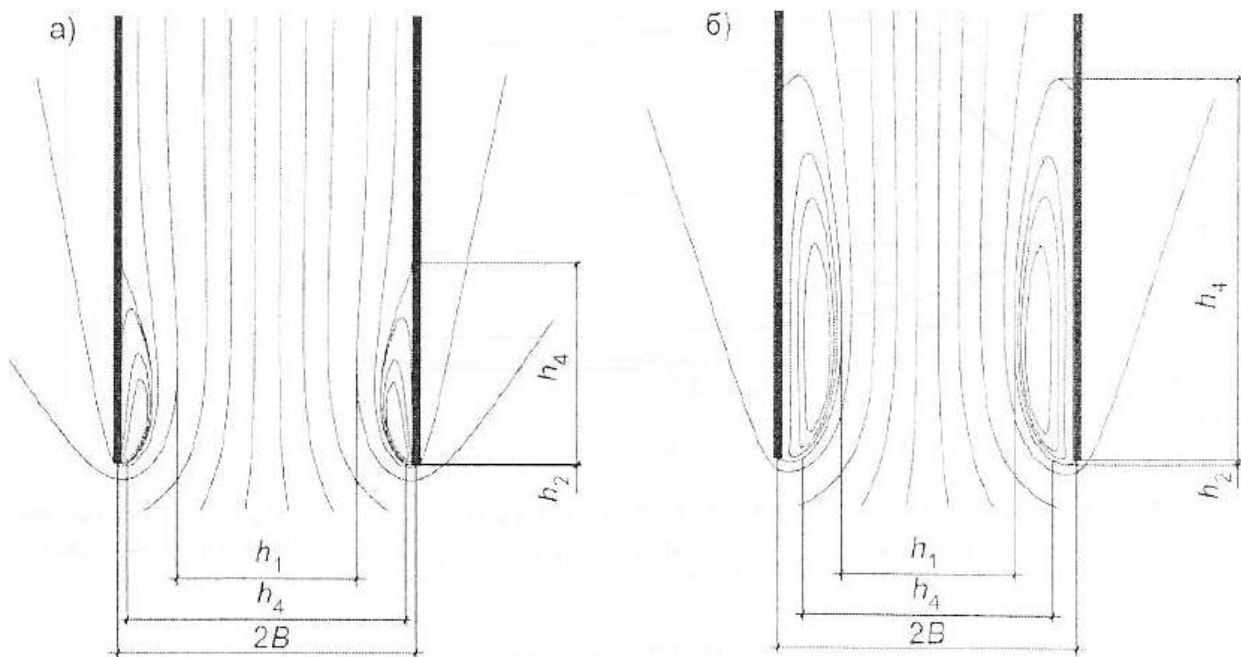


Рисунок 1.22. Линии тока для ламинарного (а) и турбулентного течений (б)

Отмечено, что расчеты дают завышенные результаты для h_2, h_3 и заниженные для h_1, h_4 .

Аспирантом Зоря В.Ю. [51, 57] для моделирования течения в аспирационных укрытиях и в щелевых неплотностях использовалось численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и неразрывности (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS) и модель $k - \varepsilon$ турбулентности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}),$$

где все величины скорости u , давления p , плотности ρ осредненные по времени.

Напряжения Рейнольдса $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ определяются в рамках стандартной $k - \varepsilon$ модели

турбулентности [95, 96]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon + \tau_{ij} \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Расчетная область течения имела вид, изображенный на рисунке 1.23.

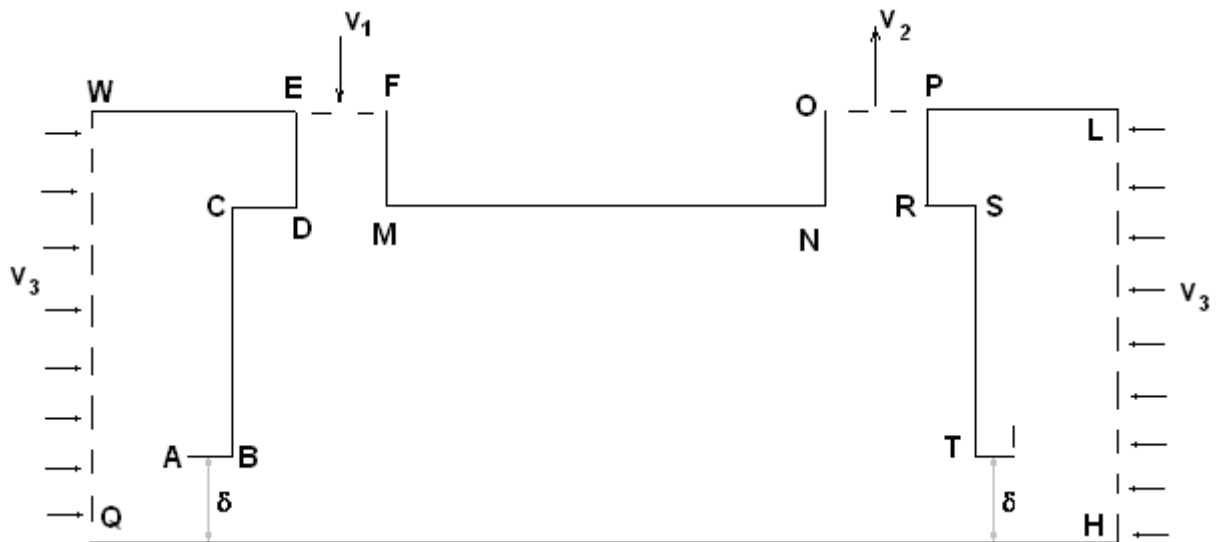


Рисунок 1.23 - Расчетная область течения

Внутри укрытия наблюдались вихреобразования (рисунок 1.24), наблюдающиеся и в натурном эксперименте.

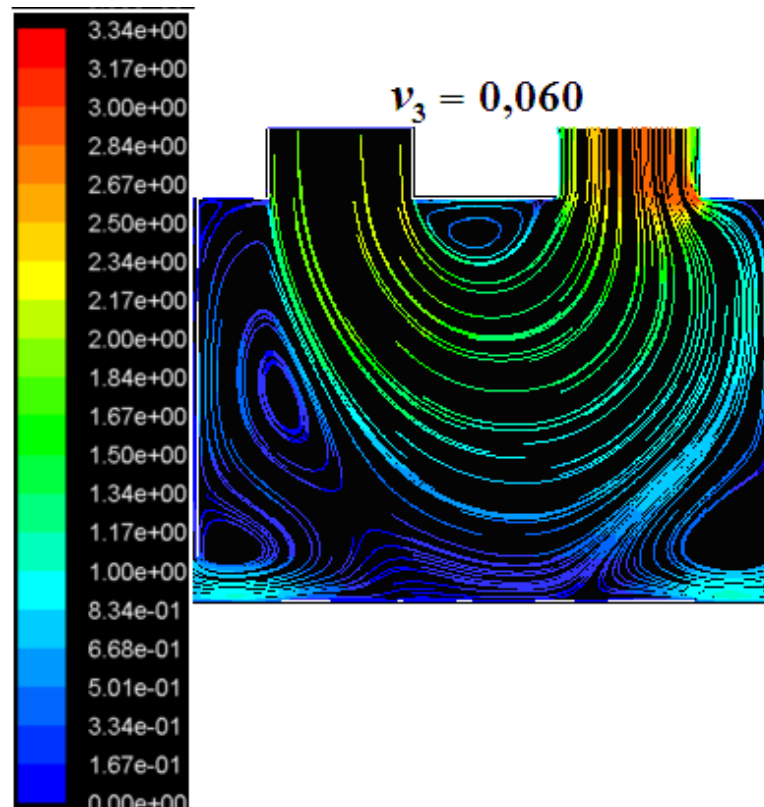


Рисунок 1.24 - Линии тока внутри аспирационного укрытия

Отрыв потока на входе в щелевые неплотности отличается от экспериментального (рисунок 1.25 а и 1.25 б) больше, чем в расчетах с использованием метода дискретных вихрей.

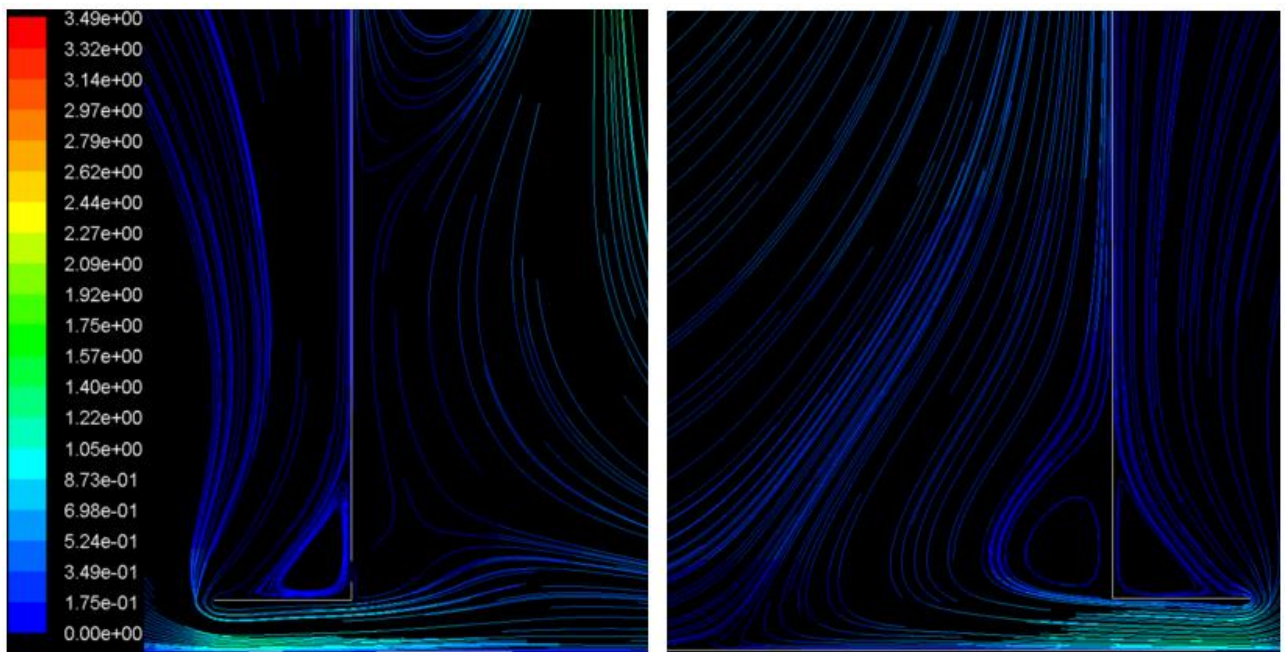


Рисунок 1.25 а - Линии тока в левой и правой щелевых неплотностях аспирационного укрытия.

$$AB = TK = 0,08 \text{ м}$$

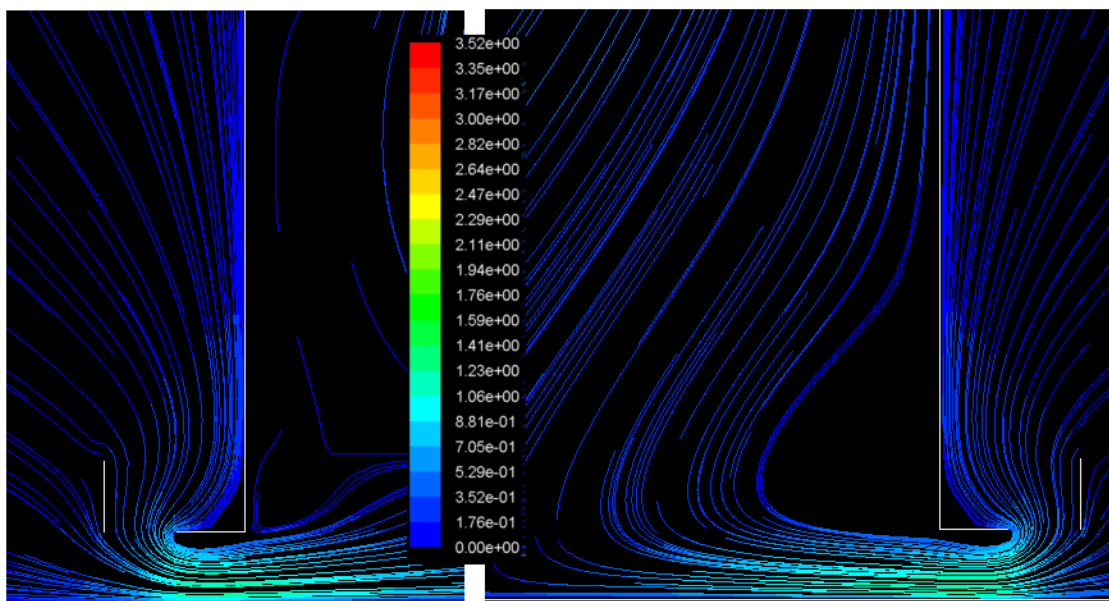


Рисунок 1.25 б - Линии тока в левой и правой щелевых неплотностях аспирационного укрытия.

$v_3 = 0,03 \text{ м/с}$, $MN = 1,2 \text{ м}$; $\delta = 0,03 \text{ м}$ и расстоянии между экранами $0,03 \text{ м}$

1.4 Рекомендации по снижению расхода воздуха, поступающего в неплотности

На основании расчетов, описанных в п.1.1-1.2 было разработано два патента [97,98]. Патент на полезную модель [97] состоял в том, что для снижения подсосов воздуха через открытые проемы, необходимо использовать механический экран длиной $0,3-0,7$ калибра, который устанавливается над открытым проемом (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26 - Щелевая неплотность с механическим экраном

Способ управления отрывом воздушного потока [98] поясняется схемой, изображенной на рисунке 1.27.

Для управления отрывом потока на входе в круглый всасывающий канал используется щит на трубе и механический экран с круглым отверстием, связанные с помощью шпилек (рисунок 1.27). Для обеспечения перпендикулярности этой системы к оси трубы и ее осевой симметрии щит, моделирующий вертикальную непроницаемую стенку 2, жестко прикреплен к скользящей по трубе трехгранной правильной призме, а шпильки для крепления экрана – к ребрам этой призмы.

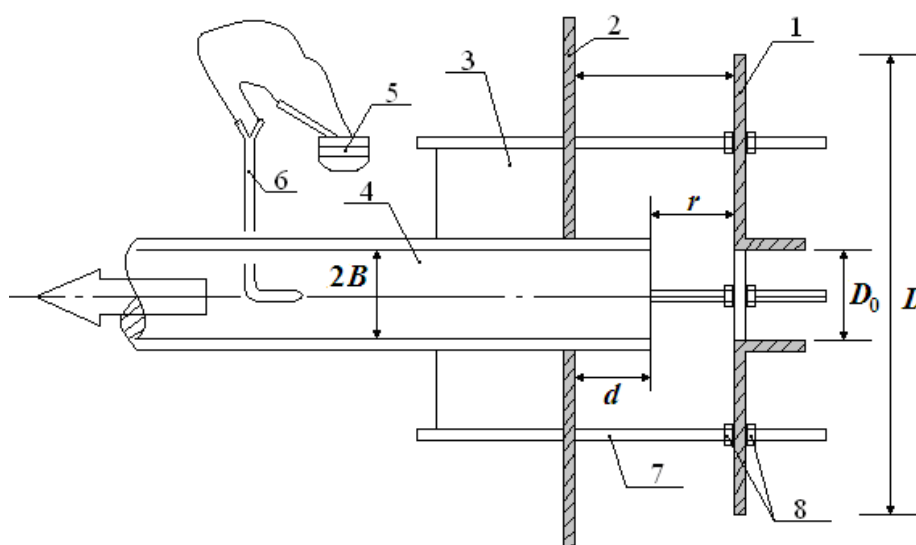


Рисунок 1.27 - Экспериментальная установка для исследования отрыва потока на входе в круглую трубу с кольцевыми экранами: 1 – механический экран с выступом; 2 – щит на трубе; 3 – направляющая призма; 4 – труба; 5 – микроманометр; 6 – пневмометрическая трубка Пито-Прандтля; 7 – стальные стержни-шпильки; 8 – гайки для фиксации экрана

Управление отрывом потока осуществляется путем изменения геометрических размеров: r – расстояния между входом во всасывающий канал и механическим экраном с центральным отверстием; d – расстояние между щитом и входом во всасывающий канал; D – внешний диаметр механического экрана с центральным отверстием; D_0 – внутренний диаметр механического экрана с центральным отверстием; $2B$ – диаметр всасывающего канала; l – ширина механического экрана. Аналогично осуществляется управление отрывом потока и для прямоугольных всасывающих каналов. Здесь в качестве механического

экрана с центральным отверстием 1 используется механический экран с прямоугольным центральным отверстием.

Для круглого всасывающего отверстия предлагается устанавливать на расстоянии 0,4 его калибра механический экран с круглым центральным отверстием с радиусом, равным радиусу круглого всасывающего канала, и шириной механического экрана, равной одному калибру. Для прямоугольных всасывающих каналов предлагается размещение механического экрана с прямоугольным центральным отверстием, с шириной и высотой равных ширине и высоте прямоугольного всасывающего канала, на расстоянии 0,7-0,8 калибра от его входа и шириной механического экрана, равного одному калибру.

Для всасывающего канала, встроенного в плоскую стенку предлагается продлить канал за стенку на 0,5 калибра, а затем устанавливать механический экран с центральным отверстием, как описано в предыдущем абзаце.

Таким образом, для данного способа управления отрывом воздушного потока технический результат состоит в повышении гидравлического сопротивления входу во всасывающий канал и снижению расхода воздуха, поступающего в него.

В данной диссертационной работе предполагается использовать механический экран с выступом, который позволит усилить эффект отрыва струи и еще более увеличить к.м.с. входа в открытый всасывающий проем. Кроме того, представляет интерес рассмотреть явление отрыва струи в пространственной постановке и исследовать отрывное течение на входе в квадратное всасывающее отверстие, которое ранее не изучалось.

Выводы по первой главе

1. В результате аналитического обзора методов расчета отрывных течений на входе во всасывающие каналы выяснено, что адекватные и достоверные результаты можно получить в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости: для односвязных плоских областей - методы теории функций комплексного

переменного (метод конформных отображений, метод профессора Н.Е.Жуковского), для многосвязных областей в плоскости и пространстве - метод дискретных вихрей.

2. Для расчета детерминированных границ отрыва потока наиболее простым и достоверным является метод дискретных вихрей в стационарной постановке. Существует необходимость разработки метода математического моделирования отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы, в спектрах действия которых находятся механические экраны сложной формы. Расчет отрыва потока на входе во всасывающие каналы квадратной или прямоугольной формы в пространственной постановке произведен ранее не был.

3. Представляет интерес исследовать влияние на отрыв потока при входе в круглые и щелевидные каналы механических экранов в виде кольца с выступом и в виде прямого двухгранного угла.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ПОТОКОВ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ

2.1 Разработка вычислительного алгоритма на примере задачи об истечении идеальной несжимаемой жидкости из дна резервуара

Задача об истечении идеальной несжимаемой жидкости из дна резервуара является модельной (тестовой), позволяющей установить адекватность разрабатываемых алгоритмов. Вначале используется метод конформных отображений и метод Н.Е. Жуковского, далее - метод моделирования отрыва потока на основе стационарных дискретных вихрей. Заметим, что задача об истечении идеальной несжимаемой жидкости является частным случаем задач об отрыве потока на входе во всасывающие каналы.

2.1.1 Решение задачи с использованием конформных отображений и метода Н.Е. Жуковского

Рассмотрим потенциальное отрывное истечение идеальной жидкости из плоского резервуара при асимметричном размещении выпускного щелевого отверстия в ступенчатом днище (рисунок 2.1).

При построении расчетных соотношений для поля скоростей используем дважды МКО: во-первых, для определения области изменения комплексного потенциала $w = \varphi + i\psi$ в верхней вспомогательной полуплоскости $t = x_1 + iy_1$ и, во-вторых, для определения в этой же полуплоскости области изменения функции Жуковского $\omega = \ln \frac{u_0}{u} + i\theta$.

Учитывая прямолинейность границ физической области истечения в плоскости $z = x + iy$, воспользуемся интегральным соотношением Кристоффеля–Шварца с учетом принятого соответствия точек. При отображении верхней

полуплоскости $\text{Im} t > 0$ на внутренность бесконечной полосы $0 \leq \text{Im} w \leq q$; $-\infty \leq \text{Re} w \leq \infty$, с учетом того, что одна из точек вспомогательной полуплоскости (а именно точка P) соответствует бесконечно удаленной точке полуплоскости, имеем:

$$w = C_w \int_0^t \frac{dt}{t - d_1} = C_w \ln \frac{t - d_1}{-d_1}.$$

Константу C_1 определим с помощью перехода сингулярной точки D по полуокружности $t - d = \varepsilon_d e^{i\alpha}$, $\alpha = \pi, \dots, 0$ бесконечно малого радиуса $\varepsilon_d \rightarrow 0$:

$$\Delta w_D = C_w \int_{\pi}^0 \frac{i \varepsilon_d e^{i\alpha}}{\varepsilon_d e^{i\alpha}} d\alpha = -C_w \pi i.$$

С другой стороны, при переходе по этой полуокружности, точка D переходит с луча $P_1 D_1$ на луч $D_2 P_2$ и потому $\Delta w_D = q \cdot i$.

Сопоставляя полученные равенства, имеем $C_w = -\frac{q}{\pi}$. Тогда:

$$w = -\frac{q}{\pi} \ln \frac{t - d_1}{-d_1}; \quad \frac{dw}{dt} = -\frac{q}{\pi} \frac{1}{t - d_1}. \quad (2.1)$$

При отображении верхней полуплоскости $\text{Im} t > 0$ на внутренность полуполосы $A_2 B_2 B_1 A_1$ с разрезом вдоль луча $\text{Re} \omega \geq \mu$; $\text{Im} \omega = -\frac{\pi}{2}$, то есть на внутренность шестиугольника $A_1 B_1 D B_2 A_2 P A_1$ с двумя вершинами (A_1 и A_2) в бесконечности, интеграл Кристоффеля–Шварца имеет следующий вид:

$$\omega = C_\omega \int_0^t \frac{dt}{(t - a_1) \sqrt{t} \sqrt{t - b} (t - 1)}. \quad (2.2)$$

Для определения константы C_ω осуществим переход сингулярных точек A_1 и A_2 по полуокружностям $t + a_1 = \varepsilon_{A_1} e^{i\alpha}$ и $t - 1 = \varepsilon_{A_2} e^{i\alpha}$ ($\varepsilon_{A_1} \rightarrow 0, \varepsilon_{A_2} \rightarrow 0, \alpha = \pi, \dots, 0$).

При переходе точки A_1 имеем

$$\Delta \omega_{A_1} = C_\omega \int_{\pi}^0 \frac{i \varepsilon_{A_1} e^{i\alpha}}{\varepsilon_{A_1} e^{i\alpha} \sqrt{-a_1} \sqrt{-a_1 - b} (-a_1 - 1)} d\alpha = -i \frac{\pi C_\omega}{\sqrt{a_1} \sqrt{a_1 + b} (1 + a_1)}.$$

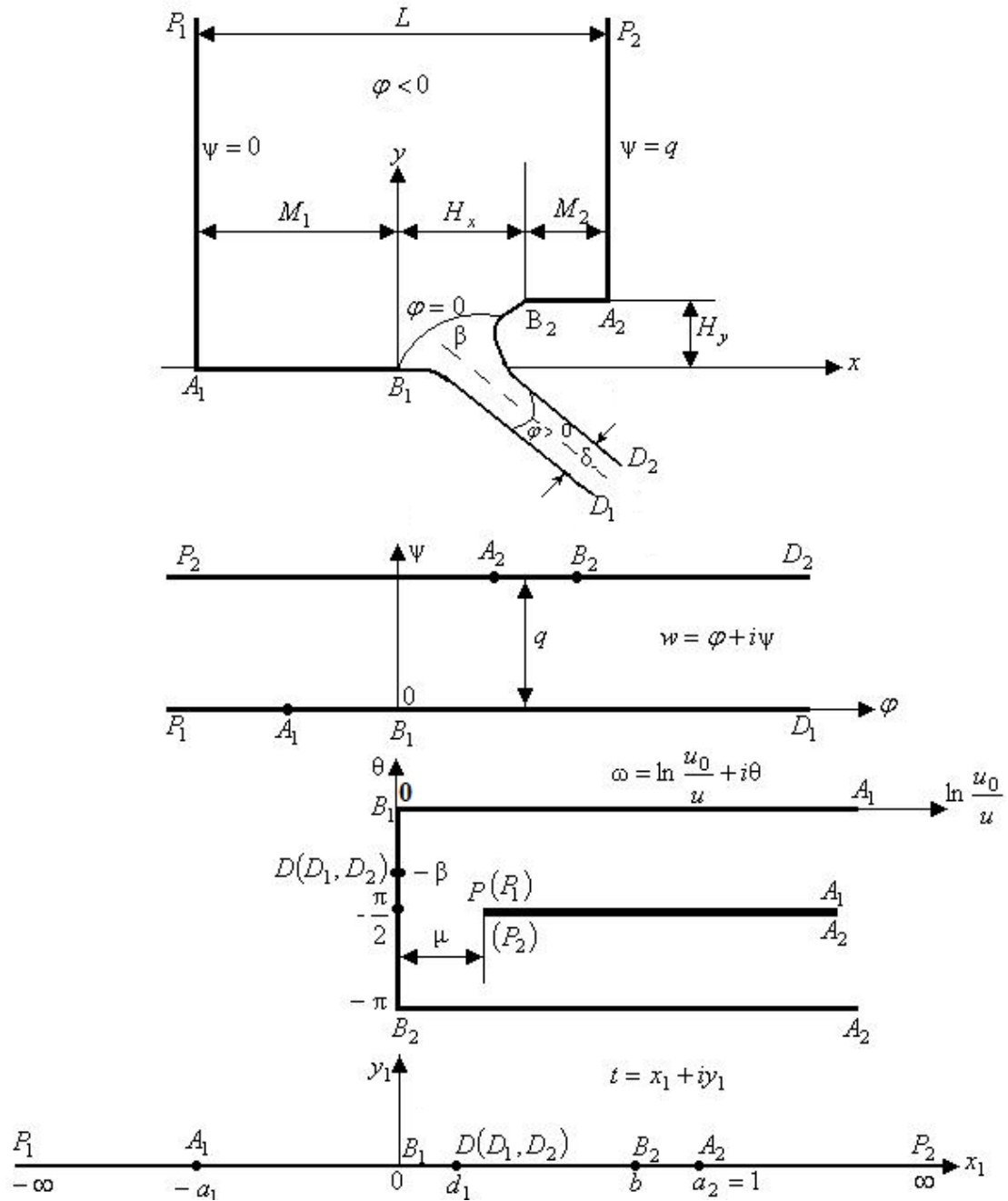


Рисунок 2.1 - К определению гидродинамического поля при отрывном истечении потенциального потока идеальной жидкости из плоского резервуара при асимметричном размещении щелевидного отверстия в днище

С другой стороны, при переходе точки A_1 с луча P_1A_1 на луч A_1B_1 функция ω получает приращение $\Delta\omega_{A_1} = \frac{\pi}{2}i$.

Сопоставляя полученные результаты, найдем

$$C_\omega = -\frac{1+a_1}{2}\sqrt{a_1}\sqrt{a_1+b}. \quad (2.3)$$

Выполняя аналогичные процедуры при переходе сингулярной точки A_2 , получим:

$$C_\omega = -\frac{1+a_1}{2}\sqrt{1-b}. \quad (2.4)$$

Сопоставляя правые части равенств (2.3) и (2.4), найдем важное соотношение между параметрами задачи:

$$a_1 = 1 - b. \quad (2.5)$$

С учетом этого $1 > b > 0$; $1 > a_1 > 0$.

Функцию Жуковского (2.2) можно представить в виде $\omega = I_1 + I_2$, где интегралы $I_1 = \frac{\sqrt{a_1}}{2} \int_0^t \frac{dt}{(t+a_1)\sqrt{t}\sqrt{t-b}}$ и $I_2 = -\frac{\sqrt{a_1}}{2} \int_0^t \frac{dt}{(t-1)\sqrt{t}\sqrt{t-b}}$ выражаются через элементарные функции, тогда функция (2.2) примет вид:

$$\omega = \frac{1}{2} \ln \frac{1+k_1 T_1}{1-k_1 T_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{k_1+T_1}{k_1-T_1}; \quad k_1 = \frac{1}{\sqrt{a_1}} \geq 1, \quad (2.6)$$

что тождественно

$$\omega = -i(\operatorname{arctg} k_1 T_1 + \operatorname{arctg} k_2 T_2); \quad k_2 = \sqrt{a_1} \leq 1, \quad (2.7)$$

$$\text{где } T_1 = \sqrt{\frac{t}{t-b}} = \frac{1}{i} \sqrt{\frac{t}{b-t}} = \frac{T_2}{i}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{t}{b-t}}.$$

Найдем функцию Жуковского в точках $P_2(t_2 = \infty)$ и $P_1(t_1 = -\infty)$.

В точке P_2 имеем $T_1 = 1$ и на основании (2.6) при $k_1 > 1$ получим:

$$\omega_{P_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+k_1}{-(k_1-1)} + \frac{1}{2} \ln \frac{k_1+1}{k_1-1} = \ln \frac{1+k_1}{k_1-1} - \frac{\pi}{2} i.$$

Сопоставляя с координатами этой точки в плоскости ω , имеем

$$\mu = \frac{1+k_1}{k_1-1}. \quad (2.8)$$

Для точки P_1 имеем $T_2 = i$ и на основании (2.7)

$$\omega_{P_1} = -i \left(\operatorname{arctg} i k_1 + \operatorname{arctg} \frac{i}{k_1} \right) = -\frac{\pi}{2} i - \ln \frac{k_1-1}{k_1+1},$$

то есть получаем тождественный результат.

В силу (2.8) для скорости жидкости в бесконечно удаленных точках P_1 и P_2 запишем:

$$u_P = u_0 \frac{k_1 - 1}{1 + k_1} = u_0 \frac{1 - \sqrt{a_1}}{1 + \sqrt{a_1}}. \quad (2.9)$$

Тогда величина расхода жидкости $q = \delta_\infty u_0 = L \cdot u_0 \frac{1 - \sqrt{a_1}}{1 + \sqrt{a_1}}$, откуда толщина струи в точке D равна $\delta_\infty = L \frac{1 - \sqrt{a_1}}{1 + \sqrt{a_1}}$.

На основании (2.6) получим:

$$e^\omega = \frac{\sqrt{1 + k_1 T_1}}{\sqrt{1 - k_1 T_1}} \frac{\sqrt{k_1 + T_1}}{\sqrt{k_1 - T_1}} = \frac{\sqrt{a_1}}{ib} \frac{2t - b + m\sqrt{t}\sqrt{t-b}}{\sqrt{t+a_1}\sqrt{t-1}}$$

и для отображения физической области течения на верхнюю полуплоскость $\text{Im} t > 0$

$$z = \frac{1}{u_0} \int_0^t e^\omega \frac{dw}{dt} dt = -\frac{q}{i\pi} \frac{\sqrt{a_1}}{b} \int_0^t \frac{2t - b + m\sqrt{t}\sqrt{t-b}}{\sqrt{t+a_1}\sqrt{t-1}(t-d_1)} dt, \quad (2.10)$$

где

$$m = \frac{1 + a_1}{\sqrt{a_1}}. \quad (2.11)$$

Осуществим переход второй бесконечно удаленной точки D физической плоскости $z = x + iy$. Переход этой сингулярной точки осуществим по полуокружности $t = d + \varepsilon_d e^{i\varphi}$, где $\varepsilon_d \rightarrow 0$, а φ изменяется от $\varphi = \pi$ до $\varphi = 0$. На основании (2.10) найдем приращение:

$$\begin{aligned} \Delta z_D &= -\frac{q}{i\pi} \frac{\sqrt{a_1}}{b} \int_{d_1 - \varepsilon_d}^{d_1 + \varepsilon_d} \frac{2t - b + m\sqrt{t}\sqrt{t-b}}{\sqrt{t+a_1}\sqrt{t-1}(t-d_1)} dt = \\ &= q \frac{\sqrt{a_1}}{b\sqrt{d_1+a_1}\sqrt{1-d}} \left[m\sqrt{d}\sqrt{b-d_1} - i(2d_1-b) \right]. \end{aligned}$$

Модуль этого приращения $|\Delta z_D| = qK_d$, где

$$K_d = \frac{\sqrt{a_1}}{b} \sqrt{\frac{(b-2d_1)^2 + m^2 d_1 (b-d_1)}{(d_1+a_1)(1-d_1)}}.$$

Заметим, что величина K_d тождественно равна единице в силу выражений (2.5) и (2.11).

Таким образом, $|\Delta z_D| = q$ и поскольку из физических соображений $q = u_0 |\Delta z_D|$, то скорость в точке D $u_0 = 1$.

Тогда из равенства $q = u_0 L = \delta_\infty \cdot 1$ и (2.9) следует важное соотношение для ширины струи в бесконечности:

$$\delta_\infty = L \frac{1 - \sqrt{a_1}}{1 + \sqrt{a_1}} = L \frac{b}{(1 + \sqrt{1-b})^2}. \quad (2.12)$$

Для угла наклона струи в точке D на основании (2.7) при $t = d_1$:

$$\beta = -\frac{180}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{a_1}} \sqrt{\frac{d_1}{b-d_1}} + \operatorname{arctg} \sqrt{a_1} \sqrt{\frac{d_1}{b-d_1}} \right]. \quad (2.13)$$

Для построения ортогональной сетки линий тока и эквипотенциальных линий рассматриваемого течения в физической области запишем соотношения для комплексного потенциала: $w = \phi + i\psi$ или с учетом (2.1), полагая $q = 1$,

$$\phi + i\psi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{-d_1}{t - d_1}, \text{ найдем}$$

$$t = d_1 \left[1 - e^{-\pi(\phi + i\psi)} \right]. \quad (2.14)$$

При известных параметрах a_1 и d_1 алгоритм численного определения ортогональной сетки заключается в следующем: задаются фиксированные значения ϕ (теоретически в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$; практически от -2 до $+2$) и строятся линии тока $\psi = \text{const}$ (в диапазоне от 0 до 1 при $q = 1$); определяются по формуле (2.14) значения t ; вычисляются по формуле (2.10) значения искомого комплексного числа $z = x + iy$ и определяются координаты соответствующих точек физической области.

Таким образом, определение всех параметров отрывного течения – скорости, угла наклона струи β , ширины струи δ_∞ в бесконечной точке D – возможно при заданных размерах резервуара, которые и определяют величину параметров a_1 и d_1 .

Для этого, например, можно задать линейные размеры ширины полок в днище резервуара M_1 и M_2 и принять в качестве единицы длины физической области проекцию на ось OX ширины отверстия $H_x = 1^1$. Тогда ширину резервуара найдем по формуле:

$$L = M_1 + M_2 + 1,$$

а параметры задачи определяются решением системы уравнений, составленной на основании (2.10) и (2.11):

$$M_1 = G \int_0^{-a_1} \frac{b - 2t + m\sqrt{-t}\sqrt{b-t}}{(t-d_1)\sqrt{t+a_1}\sqrt{1-t}} dt; \quad (2.15)$$

$$M_2 = G \int_b^t \frac{2t - b + m\sqrt{t}\sqrt{t-b}}{(t-d_1)\sqrt{t+a_1}\sqrt{1-t}} dt, \quad (2.16)$$

$$\text{где } G = \frac{L}{\pi} \frac{\sqrt{a_1}}{(1 + \sqrt{a_1})^2}.$$

Определив параметры задачи a_1 и d_1 совместным решением уравнений (2.15) и (2.16), найдем: угол наклона отрывной струи β по формуле (2.13), толщину этой струи δ_∞ по формуле (2.12) и скорость u_p в бесконечно удаленном сечении P_1P_2 резервуара по формуле (2.9). При условии $u_0 = 1$ определим координаты точки срыва $B_2(H_x, H_y)$ жидкости с полки B_2A_2 :

$$H_x = -G \int_0^{d_1-\varepsilon_d} f_3(t) dt - \delta_\infty \sin\left(\frac{\beta}{180}\pi\right) - G \int_{d_1+\varepsilon_d}^b f_3(t) dt; \quad (2.17)$$

¹ Такое допущение позволит осуществить сопоставление с результатами известных решений задачи симметричного истечения идеальной жидкости, например, задача Мизеса [99].

$$H_y = -G \int_0^{d_1 - \varepsilon_d} f_4(t) dt + \delta_\infty \cos\left(\frac{\beta}{180} \pi\right) - G \int_{d_1 + \varepsilon_d}^b f_4(t) dt, \quad (2.18)$$

$$\text{где } f_3 = \frac{b-2t}{(t-d_1)\sqrt{1-t}\sqrt{a_1+t}}; \quad f_4 = -\frac{m\sqrt{t}\sqrt{b-t}}{(t-d_1)\sqrt{1-t}\sqrt{a_1+t}}.$$

В качестве радиуса бесконечно малой полуокружности (при переходе сингулярной точки D) можно принять $\varepsilon_d \approx 10^{-10}$. Соотношение (2.17) позволяет оценить степень точности очевидного тождества $H_x = 1$ при принятой величине ε_d .

2.1.2 Сопоставление результатов расчета в частных случаях

Наглядное представление о геометрической картине истечения идеальной жидкости из резервуара со ступенчатым дном дает ортогональная сетка эквипотенциалей и линий тока (рисунок 2.2), построенная по вышеприведенному алгоритму путем численного решения системы уравнений (2.14) и (2.10). Угол наклона струи истекающей жидкости для приведенного примера составил $\beta = -54,86$ град.

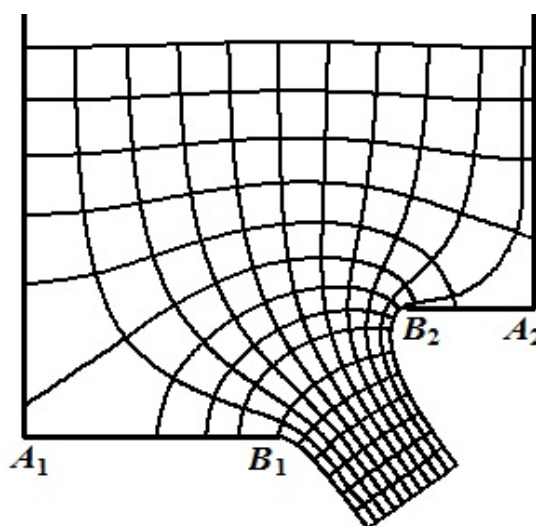


Рисунок 2.2 - Ортогональная сетка эквипотенциалей и линий тока истечения жидкости из плоского резервуара со ступенчатым дном при $L = 4$, $M_1 = 2,0$, $M_2 = 1,0$; $H_x = 1$; $H_y = 1$

$$(a_1 = 0,421810; d_1 = 0,112659)$$

При изменении ширины полок днища угол наклона изменяется (рисунок 2.3): абсолютная величина угла $|\beta|$ увеличивается при уменьшении ширины полки M_1 (и соответствующем росте M_2) при неизменной величине L .

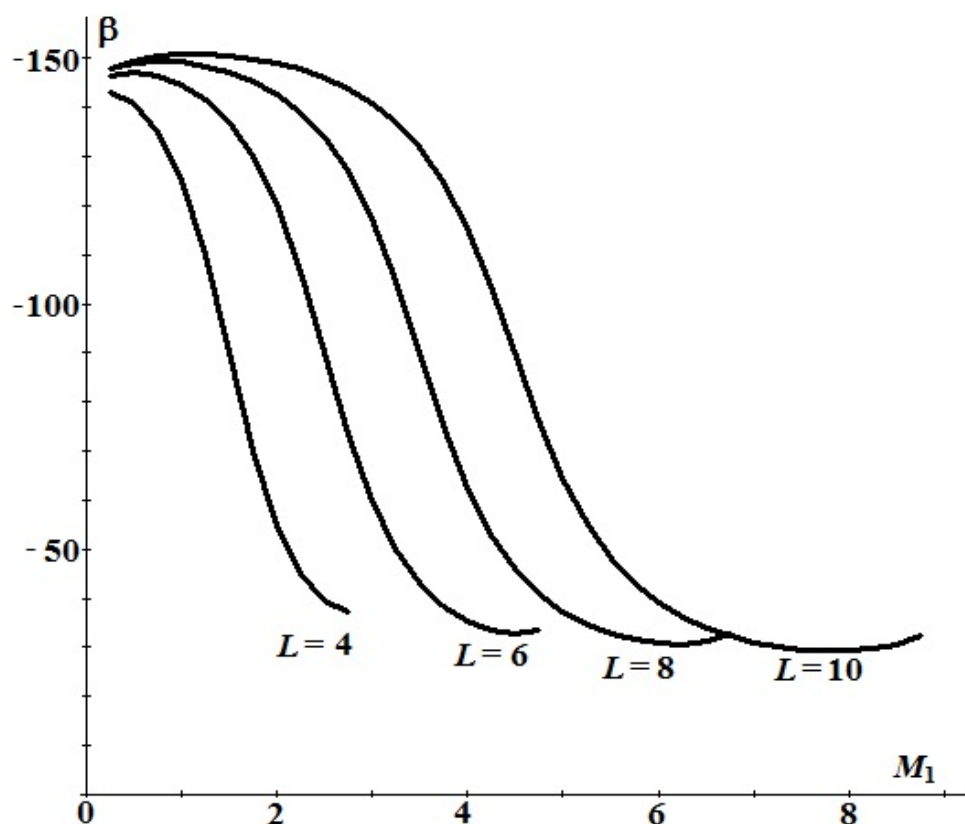


Рисунок 2.3 - Изменение угла наклона струи β в зависимости от ширины полки днища резервуара M_1

При равенстве ширины полок ($M_1 = M_2$) угол $\beta = -90^\circ$, а днище выравнивается – становится плоским ($H_y = 0$), то есть наблюдается случай симметричного истечения, решение которого выполнено Мизесом [99]. Результаты этого решения изложены в работах [7,100]. При симметричном истечении Гуревичем М.И. [7] было найдено:

$$\frac{H_x}{L} = \sqrt{h} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{h}} - \sqrt{h} \right) \arctg \sqrt{h} + 1 \right], \quad K_a = \frac{\delta_\infty^*}{H_x} = \frac{\sqrt{h}}{H_x/L}, \quad (2.19)$$

где h – параметр задачи.

Поскольку в нашем случае принято $H_x = 1$, то соотношение для коэффициента сжатия K_a можно записать в виде $\delta_\infty^* = L\sqrt{h}$, что позволяет на основании (2.19) записать уравнение:

$$\delta_{\infty}^* \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{L}{\delta_{\infty}^*} - \frac{\delta_{\infty}^*}{L} \right) \operatorname{arctg} \frac{\delta_{\infty}^*}{L} + 1 \right] = 1, \quad (2.20)$$

позволяющее найти ширину струи в бесконечно удаленной точке D . Сопоставление параметров симметричного истечения (таблица 2.1) показало, что величина ширины струи δ_{∞}^* , рассчитанной по формуле (2.12) для случая $\beta = -90^\circ$ (рисунок 2.4), практически не отличается от данных Гуревича М.И. и Мизеса Р. [99].

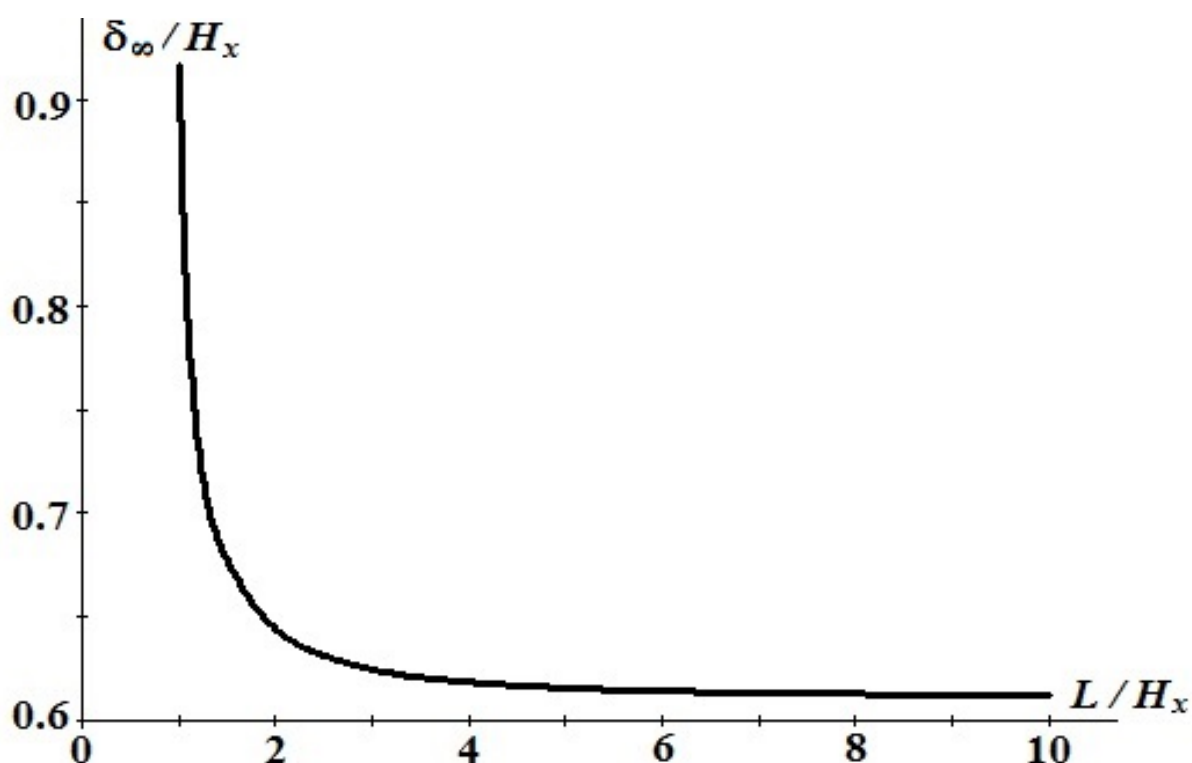


Рисунок 2.4 - Изменение толщины струи при симметричном размещении щели в плоском днище резервуара ($\beta = -90^\circ$, $H = 0$, $M_1 = M_2$)

Асимметричное истечение из резервуара со ступенчатым днищем отличается не только изменением угла наклона струи β , но и наличием связи между высотой H_y полки B_2A_2 и шириной полки $M = \max(M_1, M_2)$. Чем больше разность $|M_1 - M_2|$, тем выше абсолютная высота расположения полок относительно друг друга и тем меньше величина условного коэффициента сжатия струи (рисунок 2.5) $K_y = \delta_{\infty} / B = \delta_{\infty} / \sqrt{1 + H_y^2}$, где B – расстояние между точками схода жидкости B_1 и B_2 .

Таблица 2.1 - Сопоставление толщины струи при симметричном истечении жидкости из плоского резервуара

$M_1 = M_2$	L	a_1	d_1	δ_∞		
				по (2.12)	по (2.20)	по [100]
4,5	10	0,7826	0,1087	0,6122	0,6122	0,612
2,0	5	0,6095	0,1953	0,6158	0,6158	0,616
1,166	3,333	0,4697	0,2652	0,6221	0,6221	0,622
0,75	2,5	0,3561	0,3220	0,6314	0,6314	0,633
0,5	2,0	0,2628	0,3686	0,6444	0,6444	0,644
0,3333	1,6666	0,1816	0,4070	0,6621	0,6621	0,662
0,2145	1,429	0,1231	0,4384	0,6866	0,6866	0,687
0,125	1,250	0,0716	0,4642	0,7223	0,7223	0,722
0,0555	1,111	0,0305	0,4848	0,7807	0,7807	0,781

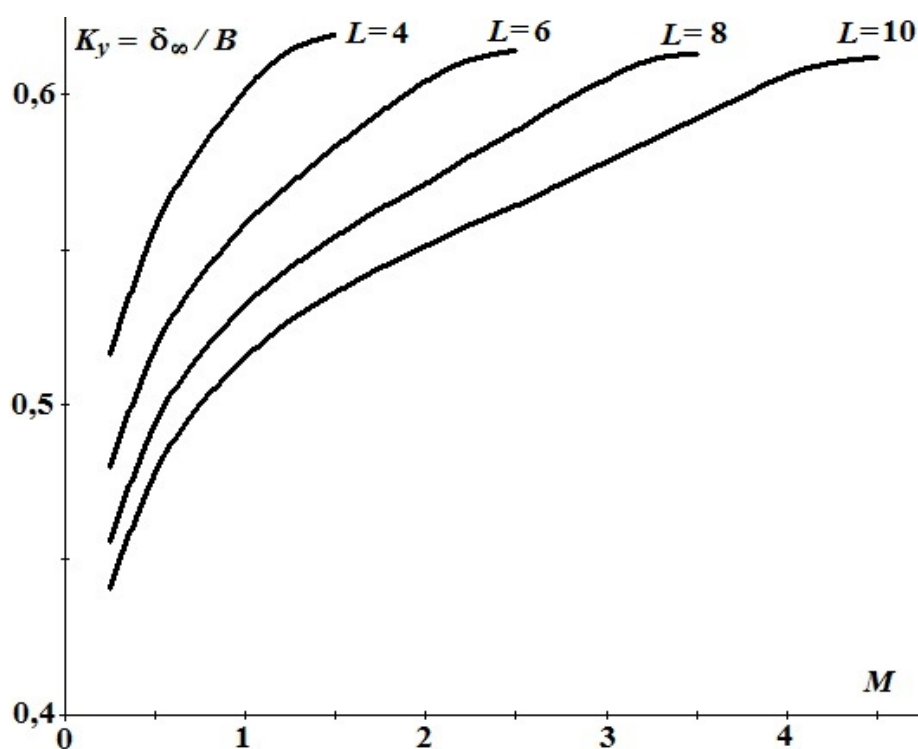


Рисунок 2.5 - Изменение условного коэффициента сжатия струи жидкости, вытекающей из плоского резервуара со ступенчатым дном в зависимости от ширины полки и ширины резервуара L

Отмеченное отличие рассмотренного истечения от симметричного объясняется появлением горизонтальной составляющей количества движения

жидкости в силу разности $(M_1 - M_2)$ и появляющегося перепада уровня полок днища.

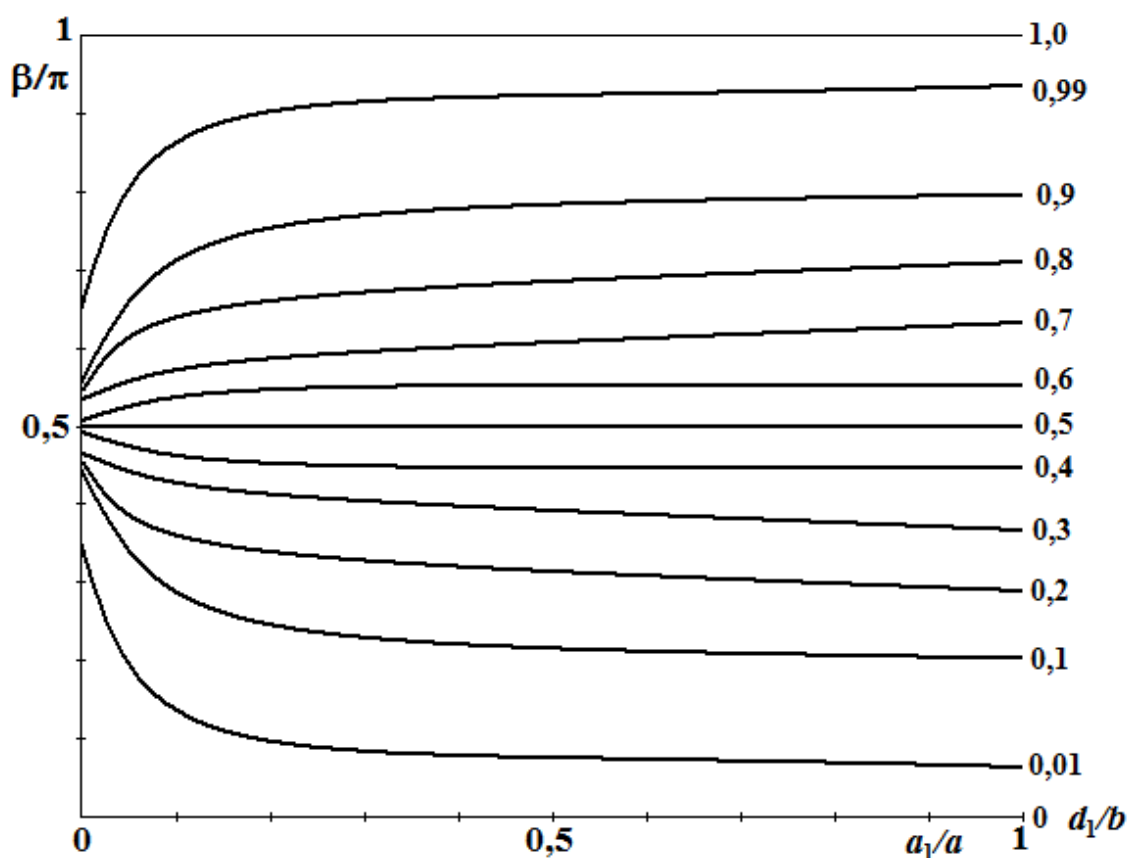


Рисунок 2.6 - Изменение угла наклона истекающей струи (свободных линий тока на бесконечности) при асимметричном размещении щелевидного отверстия в днище плоского резервуара

Равенство значений ширины струи δ_∞ в точке D , абсолютных величин угла отклонения струи от вертикали и отметки полки B_2A_3 , а также величин параметра a_1 при одинаковом соотношении линейных размеров полок ($M_1:M_2$ и $M_2:M_1$) объясняется симметрией картины течения относительно начала координат (например, «точечная» симметрия для параметра β наглядно видна на рисунке 2.6; для кривых, приведенных на этом рисунке, точкой симметрии является точка с координатами $M_1 = \frac{L-1}{2}$ и $\beta = -90^\circ$). Это позволяет исследовать лишь случай $M_1 \geq M_2$, распространяя результаты при необходимости на случай $M_1 \leq M_2$.

2.1.3 Решение задачи с использованием стационарных дискретных вихрей

Рассматривается двумерная задача об истечении жидкости из дна резервуара (рисунок 2.7). С острых кромок A и B происходит срыв потока и образуются свободные линии тока AC , BD . Необходимо определить их положение и скорость потока в любой заданной точке.

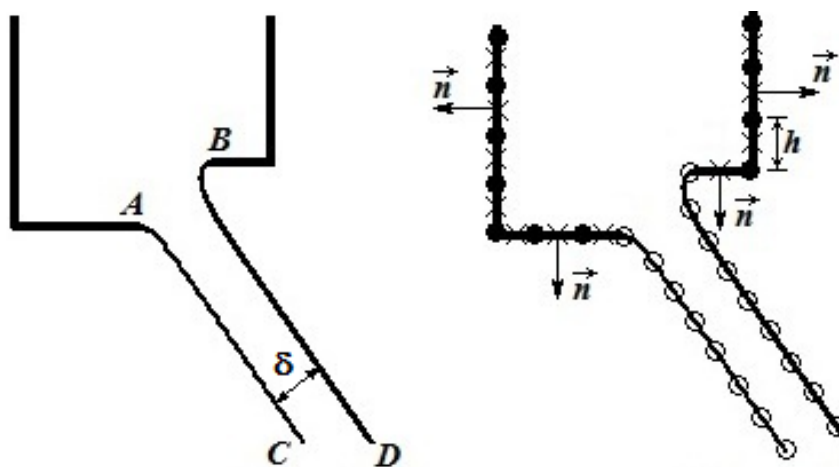


Рисунок 2.7 - Границы течения и их дискретизация

Дискретная модель строится следующим образом. Вихри, лежащие на острых кромках A и B , считаются свободными, что следует из теоремы, изложенной в монографии И.К.Лифанова [86]: интенсивность (циркуляция) присоединенного вихря в точке срыва потока равна нулю. Присоединенные вихри располагались также в точках изломов границы. На рисунке 2.7 $\bullet$ – присоединенные вихри, $\circ$ – свободные вихри, $\times$ – контрольные точки. Между присоединенными вихрями располагались контрольные точки. Точка $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка расположения k -го присоединенного вихря; $x^p(x_1, x_2)$ – p -ая контрольная точка. Тогда скорость в точке x^p вдоль единичного направления $\mathbf{n}$, вызываемая действием вихря циркуляции $\Gamma(\xi^k)$, расположенного в точке ξ^k , определится из выражения

$$v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k),$$

где $G(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}$.

Полагалось, что на искомой свободной линии тока циркуляция вихрей известна, постоянна и равна γ . Расстояние между свободными вихрями есть величина постоянная и равная h . Первое приближение для свободных линий тока: вертикальные линии, удаленные на 10 калибров (1 калибр - ширина отверстия) вниз. Будем полагать, что циркуляции свободных вихрей на линии тока AC равны циркуляциям свободных вихрей на линии тока BD по абсолютной величине, но разные по знаку, что с физической точки зрения логично. Вращение частиц жидкости, сорвавшихся с острых кромок A и B , должно осуществляться в противоположных направлениях. Соответственно, сорвавшись с точки A , вихрь вращается по часовой стрелке, поэтому $\gamma < 0$.

Обозначим N – количество присоединенных вихрей; N_{S1} – количество свободных вихрей, расположенных на свободной линии тока AC ; N_S – количество свободных вихрей на обеих линиях тока.

Суммарное воздействие всех вихрей на контрольную точку x^p вдоль направления внешней нормали выражается равенством:

$$v_n(x^p) = \sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} G(x^p, \zeta^k) - \gamma \sum_{k=N_{S1}+1}^{N_{S1}+N_S} G(x^p, \zeta^k), \quad (2.21)$$

где ζ^k – точка расположения свободного вихря.

Поскольку $v_n(x^p) = 0$ во всех контрольных точках, то есть выполняется условие непроницаемости, то при изменении $p = 1, 2, \dots, N$ выражение (2.21) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных циркуляций $\Gamma(\xi^q)$ присоединенных вихрей:

$$\sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) = -\gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} (G(x^p, \zeta^k) - G(x^p, \zeta^{k+N_S})). \quad (2.22)$$

После решения этой системы, скорость в любой точке $x(x_1, x_2)$ области вдоль любого заданного направления вычисляется по формуле (2.21).

Далее строятся свободные линии тока с использованием метода Рунге-Кутты численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$\frac{dx}{dt} = v_x$, $\frac{dy}{dt} = v_y$, где v_x, v_y определяются из выражения (2.21) при $\mathbf{n} = \{1, 0\}$ для v_x и $\mathbf{n} = \{0, 1\}$ для v_y . Линии тока строятся с острых кромок A и B . Шаг интегрирования Δt выбирается достаточно малым (например $\Delta t = 0.0001$). По свободным линиям тока равномерно с шагом h располагаются свободные вихри. После построения линий тока необходимо снова определить циркуляции присоединенных вихрей путем решения системы уравнений (2.22). Далее, на следующей итерации, опять строятся свободные линии тока, на которых располагают свободные вихри. Решается система (2.21), и производится переход к следующей итерации. Вычислительный процесс происходит до тех пор, пока толщина δ истекающей струи на данной итерации не станет отличаться от этой же величины, но найденной на предыдущей итерации на величину заданной точности ε .

Решение задачи осуществлялось при следующих параметрах дискретной модели: $\gamma = -0.1$; $h = 0.05$; $\varepsilon = 0.001$. В процессе решения определялось положение свободных линий тока, их угол наклона, толщина на бесконечности (в расчетах на удалении 10 калибров). Полученная картина истечения (рисунок 2.8) демонстрирует адекватность расчета, произведенного методом Н.Е. Жуковского.

Здесь границы стенок резервуара удалялись до 10 калибров вертикально вверх, линии тока на каждой итерации строились до тех пор, пока их ордината не достигала значения -10. Сначала строилась свободная линия тока AC . В процессе построения определялось направление вектора, начало которого совпадало с положением предыдущего свободного вихря и последующего. Как только это направление изменялось не существенно (угол относительно вертикали становился меньше 0.001), то расчет линии тока прекращался, а свободные вихри располагались вдоль найденного направления по прямой, пока их ордината не достигала величины -10. Затем строилась свободная линия тока BD аналогично линии AC . Итерационный процесс сходил за 15 итераций.

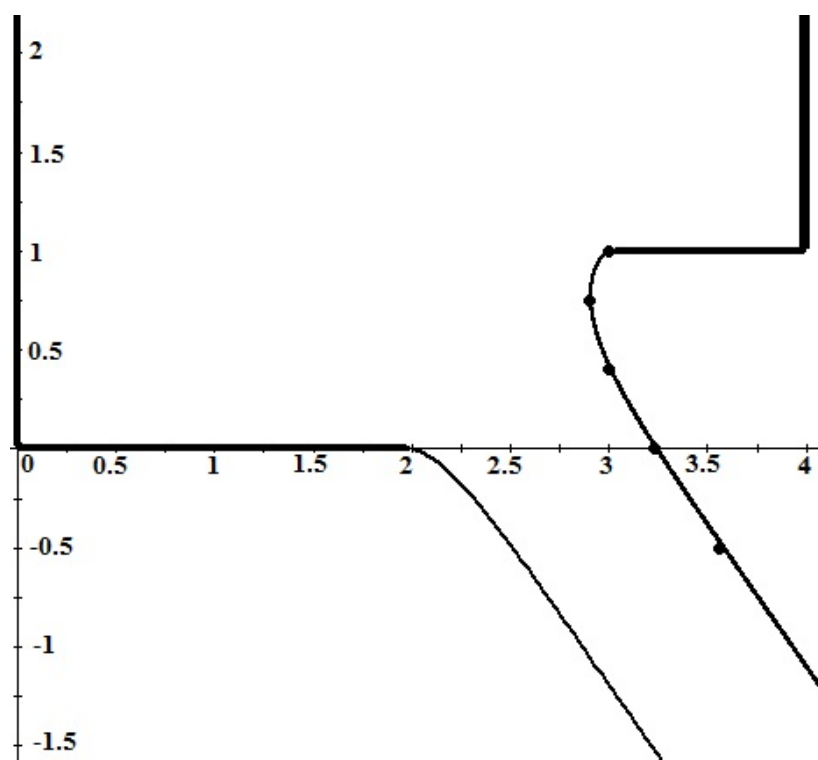


Рисунок 2.8 - Линии тока при истечении струи из дна резервуара (черные кружочки - расчеты по методу Н.Е.Жуковского)

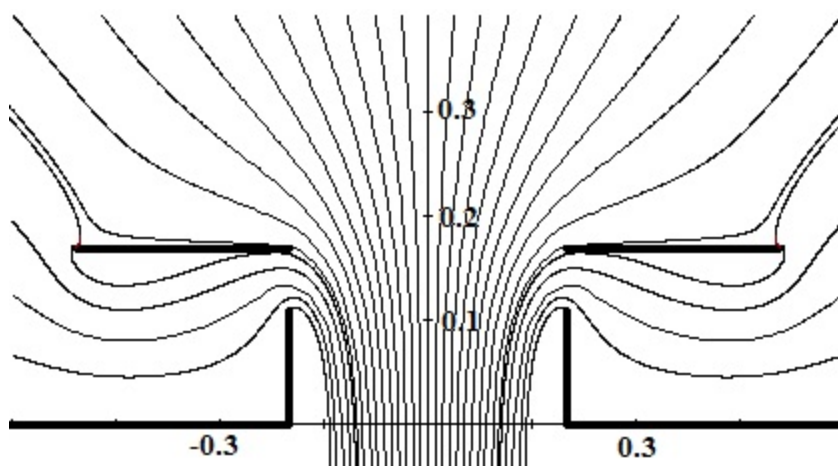


Рисунок 2.9 - Линии тока на входе в круглую трубу с кольцевым экраном

Предложенный подход для построения свободных линий или поверхностей тока, определения толщины истекающей струи может использоваться и для более сложных границ течения в многосвязных областях, для осесимметричных (рисунок 2.9) и трехмерных задач, то есть когда метод Н.Е. Жуковского не применим. На рисунке 2.9 изображен случай, когда отрыв круговых вихрей происходит с острых кромок трубы и кольцевого экрана.

2.2 Моделирование отрыва потока на входе в круглый всасывающий канал с кольцевым механическим экраном, снабженным выступом

Целью параграфа является определение геометрических размеров и удаления кольцевого экрана с выступом от соосно расположенного круглого вытяжного канала, способствующих наибольшему аэродинамическому сопротивлению входа среды в этот канал.

2.2.1 Основные расчетные соотношения

Рассмотрим область течения (рисунок 2.10) на входе в круглый всасывающий канал, в спектре действия которого находится тонкий кольцевой экран, снабженный выступом. С острых кромок A , B , C происходит срыв потока и образуются свободные поверхности тока. Необходимо определить их положение, скорость потока в любой заданной точке и к.м.с. при входе во всасывающее отверстие.

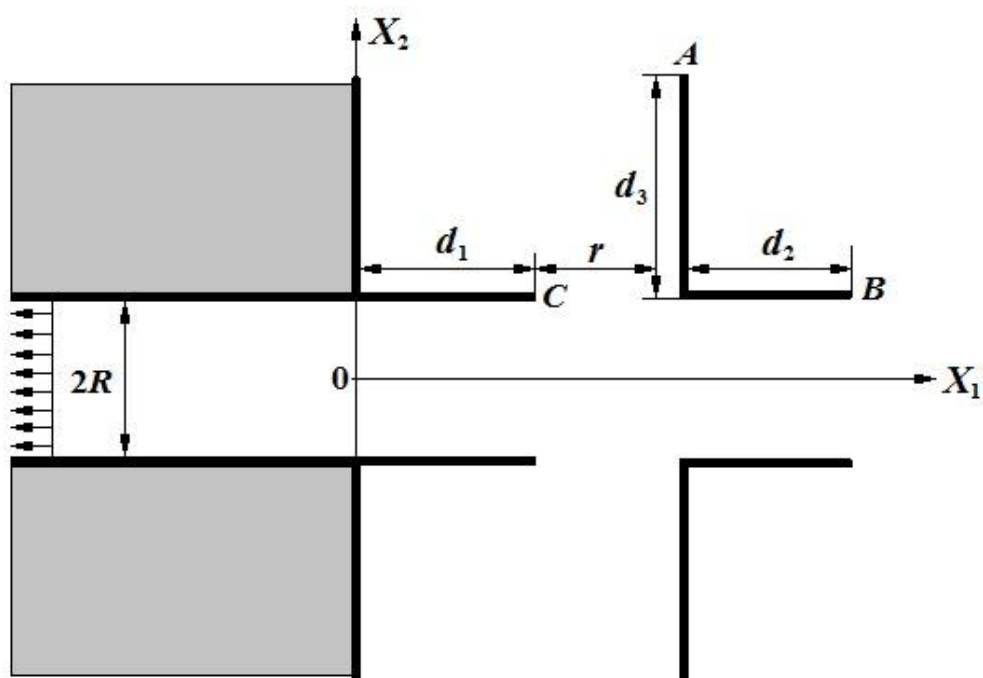


Рисунок 2.10 - Область течения в меридиональной плоскости

Математическая постановка задачи: решить уравнение Лапласа для потенциала φ :

$$\Delta\varphi = 0,$$

при известных значениях нормальной составляющей скорости на границе

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = v_n(x) - U_n,$$

где $x \in S$. Величина U_n учитывает влияние свободных вихрей, расположенных на свободных поверхностях тока, положение которых заранее неизвестно.

Данное уравнение преобразуется к граничному интегральному уравнению:

$$\int_S G(x, \xi) \omega(\xi) ds(\xi) = v_n(x) - \mu \int_\sigma G(x, \xi) ds(\xi),$$

где $\omega(\xi)$ – интенсивность граничного вихревого слоя; $\mu = const$ – интенсивность свободного вихревого слоя на поверхности σ , образованного в результате отрыва потока с острой кромки; ξ – граничная точка. Функция $G(x, \xi)$ – это проекция величины скорости в точке $x(x_1, x_2)$ на направления вектора $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$, индуцированной единичным вихрем в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$.

В случае осевой симметрии:

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} F(t) & \text{при } b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}} & \text{при } b = 0, \end{cases} \quad (2.23)$$

$$2x_2\xi_2 = b > 0, \quad a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi},$$

$$A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1],$$

$$F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad t = \frac{2b}{a+b}.$$

Вихревой слой на граничной поверхности моделируется тонкими вихревыми кольцами с циркуляцией $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$ (рисунок 2.11). Вихри, лежащие на острых кромках A, B, C , считаются свободными, что следует из теоремы, изложенной в работе [86]: интенсивность присоединенного вихря в

точке срыва потока равна нулю. Посередине между граничными вихрями находились контрольные точки. Вводились следующие обозначения: $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка размещения k -го граничного вихря; $x^p(x_1, x_2)$ – координаты p -й контрольной точки. Проекция скорости в точке x^p на направление $\mathbf{n}$, индуцированная вихрем $\Gamma(\xi^k)$ в точке ξ^k , определяется из выражения

$$v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k).$$

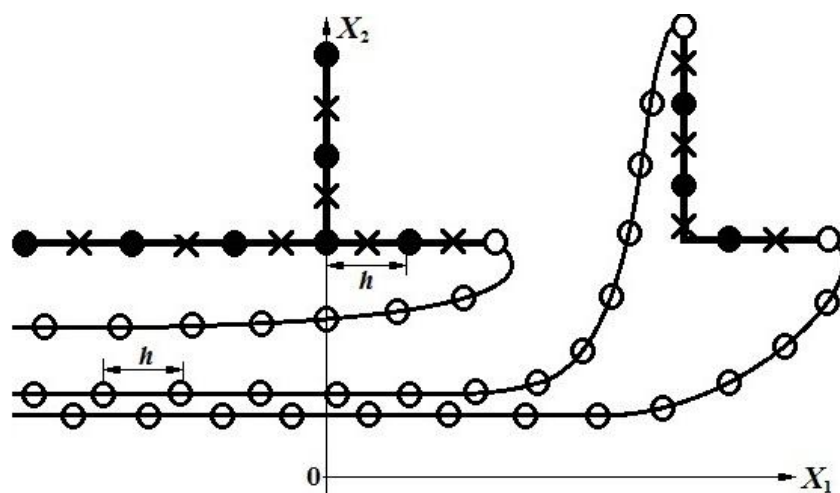


Рисунок 2.11 - Дискретная модель отрывного течения: черные кружочки - присоединенные кольцевые вихри; белые кружочки - свободные вихри; крестики - расчетные точки

Полагалось, что на свободной поверхности тока, стекающей с кромки C , интенсивность вихрей постоянна и равна γ . Расстояние между свободными вихрями есть величина постоянная и равная h . Первое приближение для свободной линии тока выбиралось следующим образом. Первые 3 вихря располагались параллельно OX_2 и ниже точки срыва, начиная с острой кромки, остальные параллельно $-OX_1$ и левее этой точки.

На острых кромках расположим свободные вихри, в остальном дискретизация не изменяется. Для свободных поверхностей тока, сходящих с острых кромок A и B , начального приближения не задавалось. Циркуляция на них заранее неизвестна. Будем полагать, что циркуляции на этих линиях тока равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку, что с физической точки

зрения логично. Вращение частиц жидкости, сорвавшихся с острых кромок экрана, должно осуществляться в противоположных направлениях.

Обозначим N – количество присоединенных вихрей, включая два свободных на кромках A и B ; номер вихря в точке A обозначим N_1 ; номер вихря в точке B – N ; ζ^k – точка расположения свободного вихря; γ_1 – интенсивность вихрей на свободных поверхностях тока, срывающихся с острых кромок A и B ; γ'_1 – эти же интенсивности найденные на предыдущей итерации; N_{S1} – количество свободных вихрей, расположенных на свободной поверхности тока, срывающейся с острой кромки C ; N_{S2} – количество свободных вихрей, расположенных на свободной поверхности, стекающей с кромки A ; N_S – количество свободных вихрей на всех линиях тока, на первой итерации $N_{S1} = N_S$.

Для определения неизвестных величин $\Gamma(\xi^q)$ решалась система уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{q=1, \\ q \neq N_1}}^{N-1} G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + (G(x^p, \xi^{N_1}) - G(x^p, \xi^N)) \gamma_1 = \\ = -\gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} G(x^p, \zeta^k) - \gamma'_1 \sum_{k=N_{S1}+1}^{N_{S2}} G(x^p, \zeta^k) + \gamma'_1 \sum_{k=N_{S2}+1}^{N_S} G(x^p, \zeta^k), \end{aligned} \quad (2.24)$$

где $p = 1, 2, \dots, N-1$, на первой итерации $\gamma'_1 = 0$.

После определяются неизвестные циркуляции $\Gamma(\xi^q)$, где $q = 1, \dots, N_1-1, N_1+1, \dots, N-1$ присоединенных вихрей и величина интенсивности свободных вихрей γ_1 . Проекция скорости в точке $x(x_1, x_2)$ на заданное направление вычислялась по формуле:

$$\begin{aligned} v_n(x) = \sum_{\substack{q=1, \\ q \neq N_1}}^{N-1} G(x, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + (G(x, \xi^{N_1}) - G(x, \xi^N)) \gamma_1 + \\ + \gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} G(x, \zeta^k) + \gamma_1 \sum_{k=N_{S1}+1}^{N_{S2}} G(x, \zeta^k) - \gamma_1 \sum_{k=N_{S2}+1}^{N_S} G(x, \zeta^k). \end{aligned} \quad (2.25)$$

На первой итерации, после определения неизвестных циркуляций вихрей, строятся все три поверхности тока, стекающие с острых кромок. После того как

они удаляются от всасывающего проема трубы на расстояние больше 10 калибров, их построение прекращается. При построении поверхностей тока шаг во времени Δt выбирается достаточно малым. Построение поверхности тока начинается с острой кромки. Свободные кольцевые вихри располагают по этой поверхности так, что расстояние между ними равно величине h .

После определения второго приближения для свободных поверхностей тока необходимо снова решить систему уравнений (2.24) и определить циркуляции присоединенных вихрей. Затем строится третье приближение свободных поверхностей тока и т.д.

Данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения коэффициента сжатия струи всасывающего патрубка на предыдущей и последующей итерации не будут отличаться на величину заданной точности ε .

Если расстояние от точки до вихря меньше радиуса дискретности $h/2$, то скорость, вызываемая этим вихрем, определяется из следующего выражения:

$$v_n(x) = 8\pi \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{h^2}.$$

Величина к.м.с. ζ при входе среды в канал определялась с помощью найденной численным путем толщины струи на бесконечности δ_∞ . Как известно, величина δ_∞ оказывает существенное влияние на величину коэффициента сопротивления входа среды в отсасывающее отверстие. Это связано с подавляющим влиянием на сопротивление эффекта Борда-Карно, заключающегося в том, что при сужении потока и последующего расширения потери давления определяются неупругим «ударом» быстрого потока с медленным. Еще в 1944 г. И.Е. Идельчик в работе [7] на основании этого эффекта предложил следующую зависимость к.м.с. от толщины сжатой струи:

$$\zeta = \left(1 - 1/\delta_\infty^2\right)^2. \quad (2.26)$$

2.2.2 Результаты расчета и их обсуждение

Расчеты производились при $R=0.2$ м. Удаление стенок трубы $10R$, шаг дискретности $h = 0.01$; шаг по времени $\Delta t = 0.000025$; $d_1 = 0.5R$; $\varepsilon = 0.0001$, в соответствии с рисунком 2.12.

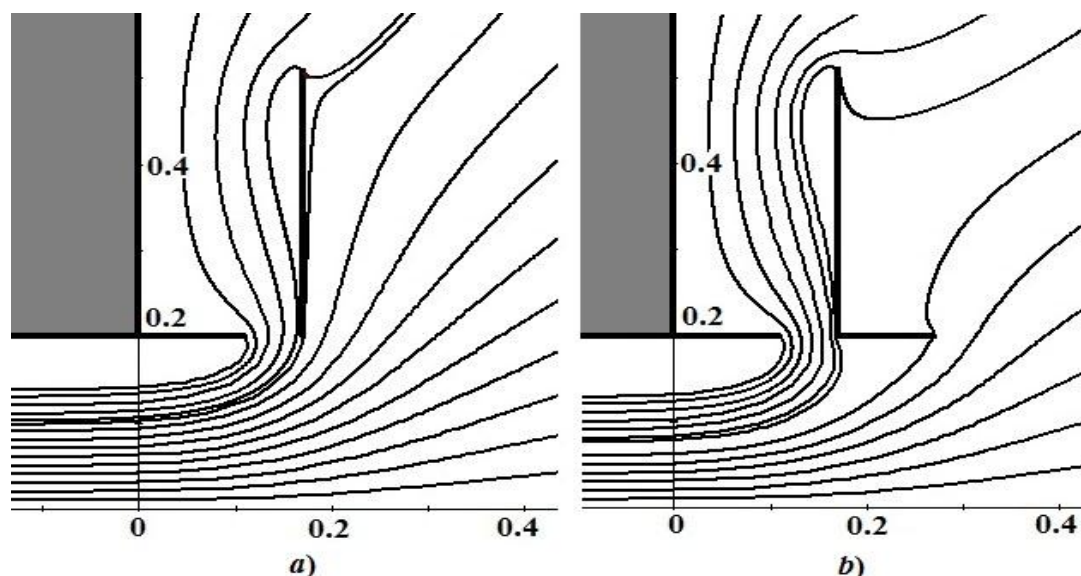


Рисунок 2.12 - Линии тока при обтекании тонкого экрана с центральным круглым отверстием при $d_1 = 0.5R$; $d_3 = 1.55R$; $R = 0.2$ м; $r = 0.3R$; а) без выступа; б) с выступом $d_2 = 0.59R$

Из расчетов линий тока (рисунок 2.12) видно, что снабжение кольцевого экрана выступом значительно изменяет структуру течения. Отрывная зона на входе в трубу расширяется, образуется дополнительная область отрыва потока под выступом.

Найденный по формуле (2.26) к.м.с. имеет завышенные значения относительно экспериментальных (рисунок 2.13). Особенно это проявляется при снабжении кольцевого экрана выступом d_2 (рисунок 2.13 с, d). Если без выступа (рисунок 2.13 а, b) наблюдается качественное совпадение экспериментальных данных с расчетом, то при оснащении экрана выступом такого совпадения нет. Поэтому предлагается следующая формула связи между к.м.с. всасывающего круглого патрубка и коэффициентом сжатия струи:

$$\zeta = \left(1 - \frac{1}{(3.115\delta^2 - 3.788\delta + 1.834)^2} \right)^2, \quad (2.27)$$

расчеты по которой дают приемлемые для практики результаты (рисунок 2.13).

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.13, снабжение кольцевого экрана выступом заметно повышает аэродинамическое сопротивление всасывающего канала. Максимальное значение к.м.с. $\zeta_m \approx 1.317$ достигается при коэффициенте сжатия струи $\delta / B = \delta_m \approx 0.608$, что следует из анализа функции (2.27) с помощью дифференциального исчисления.

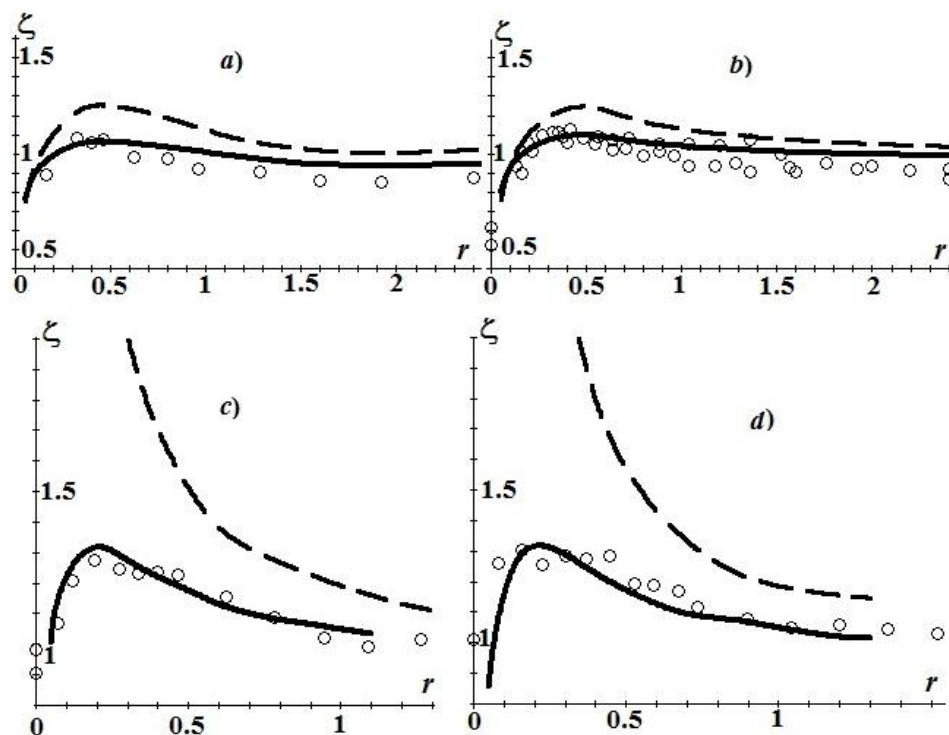


Рисунок 2.13 - Сравнение расчетных и экспериментальных величин к.м.с. ζ при удалении экрана от всасывающего проема (пунктирная линия – это расчет с использованием формулы И.Е. Идельчика (2.26); сплошная линия - по формуле (2.27); кружочки - данные эксперимента, полученные нами на экспериментальной установке, описанной в [100]): а) $d_1 = 0.5R$;

$d_3 = 1.55R$; б) $d_1 = 0.55R$; $d_3 = 1.55R$; в) $d_1 = 0.5R$; $d_2 = 0.59R$ $d_3 = 1.55R$; д) $d_1 = 0.5R$;

$d_2 = 0.96R$ $d_3 = 1.55R$

Вычислительный эксперимент позволил найти геометрические размеры экрана d_2, d_3 и его удаление r , способствующие наибольшему росту к.м.с. (рисунок 2.14).

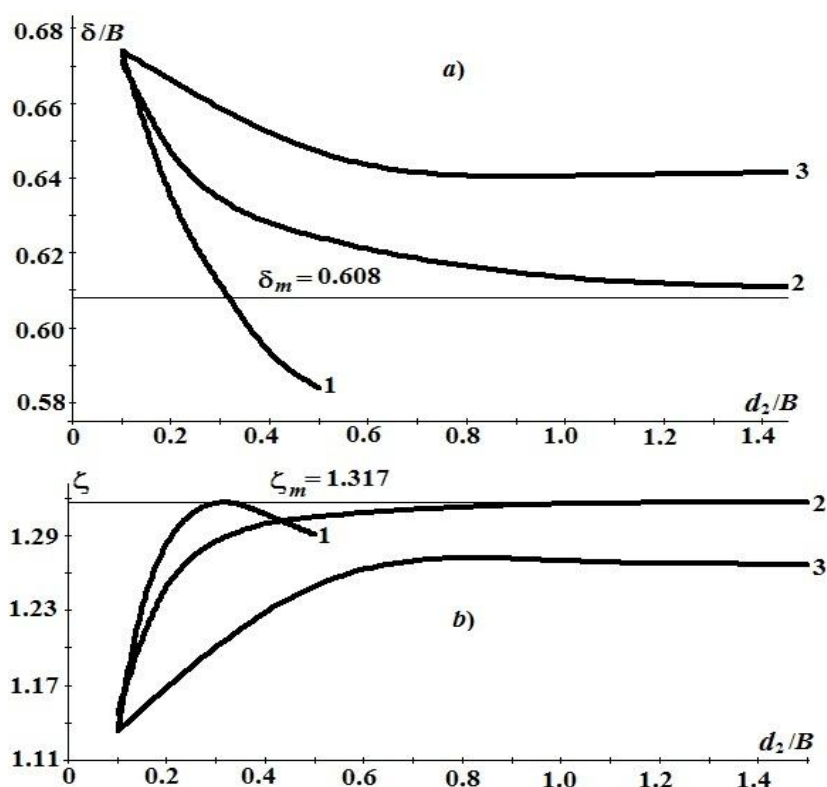


Рисунок 2.14 - Изменение коэффициента сжатия струи δ / R (a) и к.м.с. ζ (b) при увеличении длины выступа: 1 - $r = 0.1R$; $d_3 = 0.7R$; 2 - $r = 0.2R$; $d_3 = R$; 3 - $r = 0.3R$; $d_3 = R$

Величину, близкую к ζ_m , можно достичь при удалении на расстояние $r = 0.1R$ кольцевого экрана размерами $d_2 = 0.3R$; $d_3 = 0.7R$ (рисунок 2.14, кривая 1). Эту же величину можно получить и при $r = 0.2R$; $d_2 = (1 \div 1.5)R$ $d_3 = R$ (рисунок 2.14, кривая 2). Однако в первом случае расход материала на изготовление экрана с выступом будет меньше. При удалении экрана на расстояние $r = 0.3R$ (рисунок 2.14, кривая 3), если и можно достичь величины ζ_m близкой к максимуму, то при больших размерах высоты экрана и выступа. Здесь во всех расчетах величина выступающей части трубы $d_1 = 0.5R$.

Результаты натурного эксперимента, представленного на рисунке 2.13, получены на лабораторной установке (рисунок 2.15).

К.м.с. на вход воздуха в воздуховод определялся из соотношения

$$\zeta = 2\Delta P / (\rho u^2),$$

представляющим собой отношение разности полных давлений к динамическому (скоростному) давлению. Опыты проводили на установке (рисунок 2.15),

измерительная часть которой состоит из микроманометра ММН-2500 и пневмометрической трубки Пито-Прандтля. Измерения давлений проводили в сечении, удаленном на расстоянии 1.5 м от оси входного сечения винипластовой трубы с внутренним диаметром 125 мм и толщиной стенки 1.7 мм. Система экранов (щита на трубе и экрана с круглым отверстием с выступом) связаны с помощью стальных шпилек диаметром 4 мм и длиной 400 мм. Для обеспечения перпендикулярности этой системы к оси трубы и ее осевой симметрии щит, моделирующий вертикальную непроницаемую стенку, жестко прикреплен к скользящей по трубе трехгранной правильной призме высотой 100 мм, а шпильки для крепления экрана – к ребрам этой призмы.

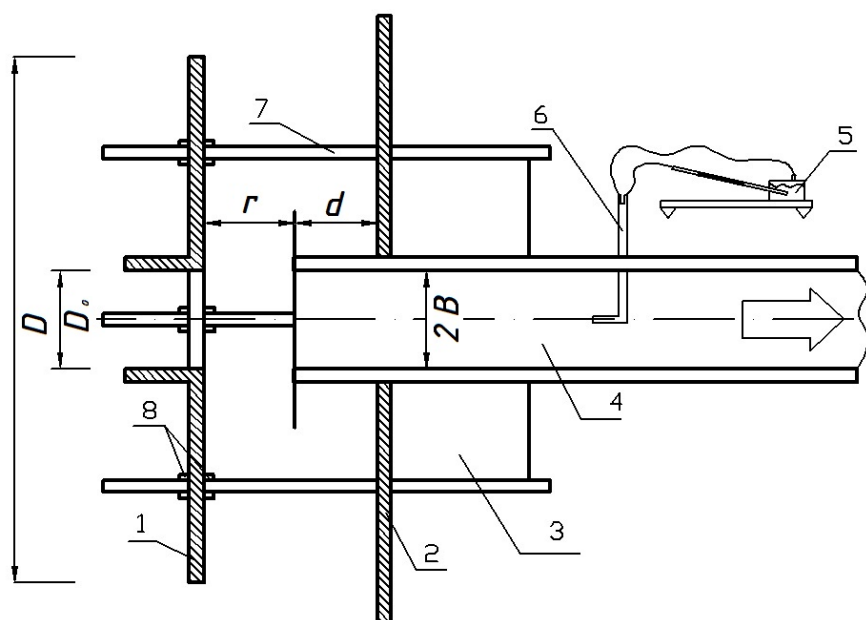


Рисунок 2.15 - Схема экспериментальной установки для определения сопротивления при входе воздуха в экранированное круглое отверстие: 1 – экран с центральным отверстием и выступом; 2 – щит; 3 – направляющая трехгранная призма; 4 – труба; 5 – микроманометр с наклонной трубкой; 6 – пневмометрическая трубка Пито-Прандтля; 7 – стальные стержни-шпильки; 8 – гайки для фиксации экрана

Щит и экран с выступом выполнены из прессованного картона толщиной 4 мм. Для жесткой фиксации и установки экрана на нужном расстоянии r использовали гайки для зажима с двух сторон. Средняя скорость u воздушного течения в трубе определялась при помощи замеров скоростного осевого давления и использования поправочного коэффициента, учитывающего неравномерность

поля скоростей. [72]. Потерями давления на трение о стенки трубы от входного до замерного сечения пренебрегали (не только из-за гладкости трубы, но и из-за невозможности корректного учета этих потерь в условиях стабилизации потока при отрывном входе воздуха). Средняя скорость воздуха в трубе составляла 7–9 м/с.

Выводы по второй главе

1. Решение задачи об истечении идеальной жидкости из дна резервуара позволяет сделать вывод об адекватности метода расчета струй идеальной несжимаемой жидкости с помощью стационарных дискретных вихрей. Применение данного подхода позволяет решать задачи с более сложными границами и иной размерности, где метод Н.Е. Жуковского не применим.

2. Разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа расчета отрыва потока на входе во всасывающий круглый канал, снабженный механическим кольцевым экраном с выступом.

3. Вычислительный и натурный эксперимент позволили установить размеры и расположение экранов, способствующих наибольшему сопротивлению входа во всасывающий канал за счет эффекта отрыва струи. Для круглых всасывающих отверстий, выступающих из плоской стенки на расстояние полурадиуса, предлагается устанавливать на расстоянии 0.1-0.2 радиуса диск с центральным отверстием такого же диаметра, что и всасывающий канал, и шириной кольца равной 0.7-1 радиуса, что позволяет увеличить к.м.с. на 20% относительно случая отсутствия этого экрана.

4. Определена аналитическая зависимость к.м.с. от коэффициента сжатия струи.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ НЕПЛОТНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

3.1 Описание экспериментальной установки

Данный эксперимент проводился с целью выявить зависимости отрывных пылегазовых течений в системах аспирации и разработать научно-обоснованные предложения по снижению их энергоемкости. Для экспериментального выявления влияния на к.м.с. механических экранов разработана полупромышленная установка – укрытие (рисунок 3.2), представляющее собой короб с подведенным к нему вытяжным устройством. С торца короба находится неплотность с фиксированной высотой. Для определения давлений внутри использовались два штуцера: для замера статического давления внутри укрытия и для определения статического и динамического давлений в трубе вытяжного устройства. Стенки укрытия изготовлены из прозрачного материала.

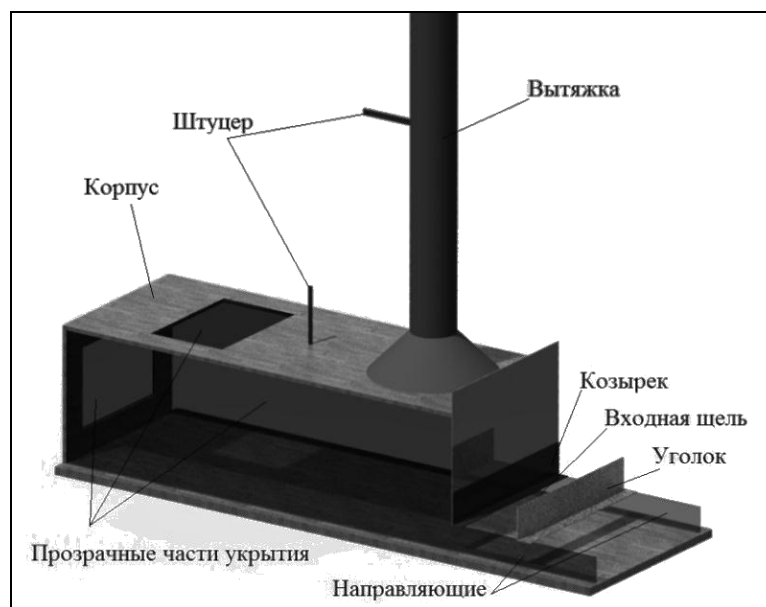


Рисунок 3.1 - Модель укрытия

Для повышения эффективности работы укрытия над неплотностью имеется козырек, длина которого может варьироваться, применялись также различные

приспособления, влияющие на аэродинамику потока на входе в укрытие. В данном случае на рисунке 3.1 в качестве такого приспособления представлен уголок. Все приспособления находились не ниже уровня высоты направляющих. Для наглядного отображения аэродинамических процессов использовался оптический шлирен – метод, визуализация процесса фиксировалась на камеру. В процессе проведения эксперимента фиксировались также величины, необходимые для расчета к.м.с. на входе в укрытие, расхода воздуха, скорости потока воздуха. Методы измерения приведены в приложении Б.

3.2 Методика расчета к.м.с.

Для оценки эффективности того или иного приспособления, влияющего на поле скоростей при входе в укрытие использовался к.м.с. В современных гидравлических расчетах оперируют безразмерным коэффициентом гидравлического сопротивления, весьма удобным тем, что в динамически подобных потоках, при которых соблюдаются геометрическое подобие участков и равенство чисел Рейнольдса Re (и других критериев подобия, если они существенны), он имеет одно и то же значение независимо от вида жидкости (газа), а также от скорости потока (по крайней мере, до $M = 0,8-0,9$) и поперечных размеров рассчитываемых участков.

В общем случае для потока как неупругой (капельной), так и упругой жидкости (газа) с неравномерным распределением скоростей и давлений по сечению соответствующее уравнение энергий (мощности) имеет вид:

$$\int_{F_0} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF = \int_{F_1} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF + \Delta N_{общ}, \quad (3.1)$$

где z - геометрическая высота центра тяжести соответствующего сечения, м;

p - статическое давление (абсолютное) в точке соответствующего сечения, Па;

w – скорость потока в данной точке сечения трубы (канала), м/с;

ρ - плотность газа в сечении, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 ;

U -удельная внутренняя (тепловая) энергия газа (которая была бы при течении без трения), Дж/кг ;

$\Delta N_{\text{общ}}$ - общая мощность, теряемая на участке между двумя сечениями и характеризующая величину механической энергии, превращаемой в теплоту, Вт. Если мощность потока отнести к объемному расходу через определенное сечение, например 0-0 ($Q_0 = \int_{F_0} w dF$), в соответствии с рисунком 3.2,

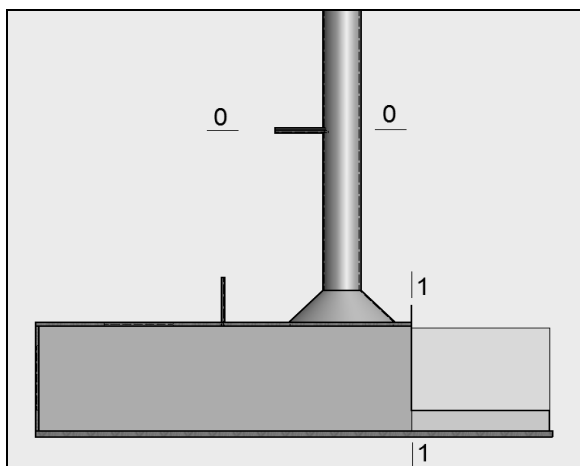


Рисунок 1.2 - Укрытие, вид сбоку

то после некоторых преобразований можно записать:

$$\Delta p_{\text{общ}} \equiv \frac{\Delta N_{\text{общ}}}{Q_0} =$$

$$= \frac{1}{Q_0} \int_{F_0} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF - \frac{1}{Q_0} \int_{F_1} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF ;$$

или $\Delta p_{\text{общ}} =$

$$= \frac{1}{Q_0} \int_{F_0} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF - \frac{Q_1}{Q_0} \frac{1}{Q_1} \int_{F_1} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) w dF .$$

Но $\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\int_{F_0} \rho dF}{\int_{F_1} \rho dF} = \frac{\rho_0}{\rho_1}$ и $\rho_0 Q_0 = Q_1 \rho_1 = G$, поэтому можно написать

$$\begin{aligned}
\Delta p_{\text{общ}} &\equiv \frac{\Delta N_{\text{общ}}}{Q_0} = \\
&= \frac{1}{G} \int_{F_0} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) \rho w dF - \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{1}{G} \int_{F_1} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) \rho w dF = \\
&= p_0^* - p_1^*,
\end{aligned} \tag{3.2}$$

где $G = \int_F \rho w dF$ - массовый расход,

$$p_0^* = \frac{1}{G} \int_{F_0} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) \rho w dF \quad - \quad \text{полное давление, осредненное по}$$

массовому расходу через сечение 0-0 (рисунок 3.2),

$$p_1^* = \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{1}{G} \int_{F_1} \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + g \rho z + \rho U \right) \rho w dF \quad - \quad \text{полное давление, осредненное по}$$

массовому расходу через сечение 1-1 (рисунок 3.2),

$$\Delta p_{\text{общ}} = \frac{\Delta N_{\text{общ}}}{Q_0} \quad - \quad \text{общие потери полного давления на участке между сечениями 0-0}$$

и 1-1 (рисунок 3.2), приведенные к объемному расходу Q_0 .

Нельзя разделить потери полного давления в сколько-нибудь сложном элементе трубопровода. Хотя для удобства расчетов в одном элементе трубопровода их можно условно разделить на «местные» потери (Δp_m) и потери «трения» (Δp_{mp}). И считают «местные» потери (местное сопротивление) сосредоточенными в одном сечении, но в действительности они действуют на сравнительно большой длине.

Оба вида потерь складывают из принципа наложения потерь, то есть берут сумму потерь «трения» и местных потерь:

$$\Delta p_{\text{сум}} = \Delta p_{mp} + \Delta p_m.$$

Величину Δp_{mp} практически следует учитывать только для сложных частей большой протяженности, или в случае, когда она соизмерима с величиной Δp_m .

Коэффициент гидравлического сопротивления является отношением потерь на участке [(0-0) – (1-1)] полной энергии (мощности) к кинетической энергии (мощности) в принятом сечении (например, 0-0) или отношением потерь на том же участке полного давления к динамическому давлению в принятом сечении, в соответствии с рисунком 3.2. Так что на основании (3.1) и (3.2) в общем случае, то есть при переменной плотности вдоль потока и неравномерном распределении всех параметров потока по сечению, можно написать:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta N_{\text{общ}}}{\rho_0 F_0 w_0^3 / 2} = \frac{\Delta N_{\text{общ}}}{Q_0 \rho_0 w_0^2 / 2} = \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\rho_0 w_0^2 / 2}.$$

Значение ζ зависит от того, к какой расчетной скорости, а, следовательно, к какому сечению он приведен. Коэффициент сопротивления, приведенный к скорости потока w_i в 1-м сечении (F_1), пересчитывается для другого сечения (например, F_0) в общем случае (ρ - переменное вдоль потока) по формуле

$$\zeta_0 \equiv \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\rho_0 w_0^2 / 2}.$$

Так как скорость потока во много раз меньше скорости звука будем считать течение несжимаемым. Следовательно, при неизменной плотности вдоль потока

$$\rho_0 = \rho_1 = \rho = \text{const}$$

$$\zeta \equiv \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\rho w_0^2 / 2}.$$

С учетом уравнения расхода

$$\rho_0 w_0 F_0 = \rho_i w_i F_i, \text{ или } w_0 F_0 = w_i F_i; w_i = w_0 \frac{F_0}{F_i}. [101]$$

В диапазоне скоростей движения газов в пылеулавливающих установках при скоростях, не превышающих 70 м/с, для определения скорости пользуются выражением

$$P_0 = w^2 \rho / 2, \text{ или } w = \sqrt{2P_0 / \rho},$$

где P_0 - динамический напор газового потока, кгс/м². [102]

Итак, для сечения 0-0 запишем

$$w_0 = \sqrt{2P_{\partial_0} / \rho},$$

для сечения 1-1

$$w_1 = w_0 \frac{F_0}{F_1} = \frac{F_0}{F_1} \sqrt{2P_{\partial_0} / \rho}. \quad (3.3)$$

где P_{∂} - динамический напор газового потока, Па.

Общие потери полного давления при прохождении сечения 1-1 (рисунок 3.2) $\Delta P_{\text{общ}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{укр.ср}}$, где $P_{\text{атм}}$ - атмосферное давление, кгс/м³; $P_{\text{укр.ср}}$ - среднее значение полного статического давления в укрытии, кгс/м³. Экспериментально было установлено, что среднее значение статического давления лабораторного укрытия примерно равно значению давления, замеренного в точке, находящейся в центре верхней стенки укрытия.

Таким образом, значение ζ для сечения 1-1 (рисунок 3.2) будет рассчитываться следующим образом:

$$\zeta_1 = \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{укр}}}{\rho w_1^2 / 2}, \quad \zeta_1 = \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{укр}}}{\rho \left(\frac{F_0}{F_1} \sqrt{\frac{2P_{\partial_0}}{\rho}} \right)^2 / 2},$$

$$\text{или } \zeta_1 = \frac{F_1^2}{F_0^2} \frac{(P_{\text{атм}} - P_{\text{укр}})}{P_{\partial_0}}. \quad (3.4)$$

Для более наглядного сравнения результатов далее в расчетах представлена величина

$$\delta = \frac{\zeta_1 - \zeta_0}{\zeta_0} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

отклонения к.м.с. неплотности с механическим экраном ζ_1 от к.м.с. без механических экранов ζ_0 .

В инженерной практике соотношение для расхода воздуха, поступающего в укрытия через неплотности, имеет вид

$$G = S \sqrt{\frac{2p \rho_o}{\zeta}}, \quad (3.6)$$

где S - площадь неплотностей укрытия, м^2 ; p - разрежение, поддерживаемое в укрытии, Па ; ζ - к.м.с. неплотности; ρ_o - плотность окружающей среды, кг/м^3 . Используем также величину отклонения расхода G_2 , поступающего через неплотность, оборудованную экранами, от расхода G_1 , поступающего в неплотность без экранов:

$$\delta_G = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100\% = \left(\sqrt{\frac{1}{0,018 + 1}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (3.7)$$

3.3 Постановка экспериментов

3.3.1 Исследование влияния механического экрана в виде козырька

Серия экспериментов по исследованию закономерностей развития вихревых структур на входе в щелевую неплотность аспирационного укрытия, оснащенную входной кромкой в виде козырька, в соответствии с рисунком 3.3. В ходе опытов исследуется влияние длины козырька на аэродинамическое сопротивление входа укрытия в виде прямоугольного щелевого отверстия.

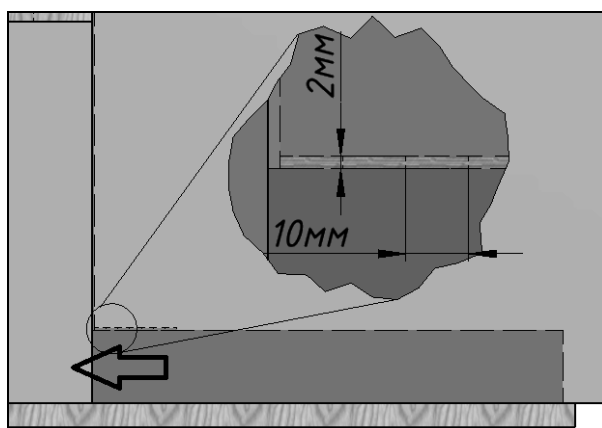


Рисунок 3.3 - Козырек над щелевой неплотностью укрытия, вид сбоку

Скорость вращения вытяжного вентилятора постоянная. Длина козырька изменяется в пределах $l=0 - 2,5$ калибра, B – ширина щелевой неплотности входа укрытия (60мм) – 1 калибр.

Козырек представляет собой сборную единицу, состоящую из тонких металлических пластин размером 2x10x435 мм. Пластины присоединяются вплотную друг к другу таким образом, что с каждой новой прикрепленной пластиной длина козырька увеличивается на 10 мм, скрепление пластин производится посредством магнитной ленты. Козырек устанавливается вплотную к коробу укрытия. Другие подсосы воздуха, помимо входной щелевой неплотности, отсутствуют, либо крайне незначительны и их воздействием можно пренебречь. Эксперимент повторяется три раза.

Замеряемые величины:

- динамическое давление в трубе $P_{дин.изм}$
- давление (статическое) разряжения в укрытии $P_{ст.укр.и}$
- температура среды $t_{изм}, ^\circ\text{C}$

Расчетные величины:

- скорость V (м/с) потока воздуха в сечении 1-1 (3.3) (рисунок 3.2),
- к.м.с. щелевой неплотности (3.4),
- величина δ отклонения к.м.с. (3.5),
- массовый расход воздуха G (3.6),
- величина δ_G отклонения массового расхода воздуха (3.7).

Измеренные и расчетные величины представлены в таблице 1 приложения В.

При помощи шлирен-метода получены снимки эффекта срыва потока воздуха с края козырька (рисунок 3.4). На шести снимках в верхней левой части каждого снимка находится козырек. Круглая форма снимков обусловлена формой линзы, применяемой при использовании шлирен-метода. На снимках в виде светлой полосы зафиксирован срыв потока воздуха с края козырька.

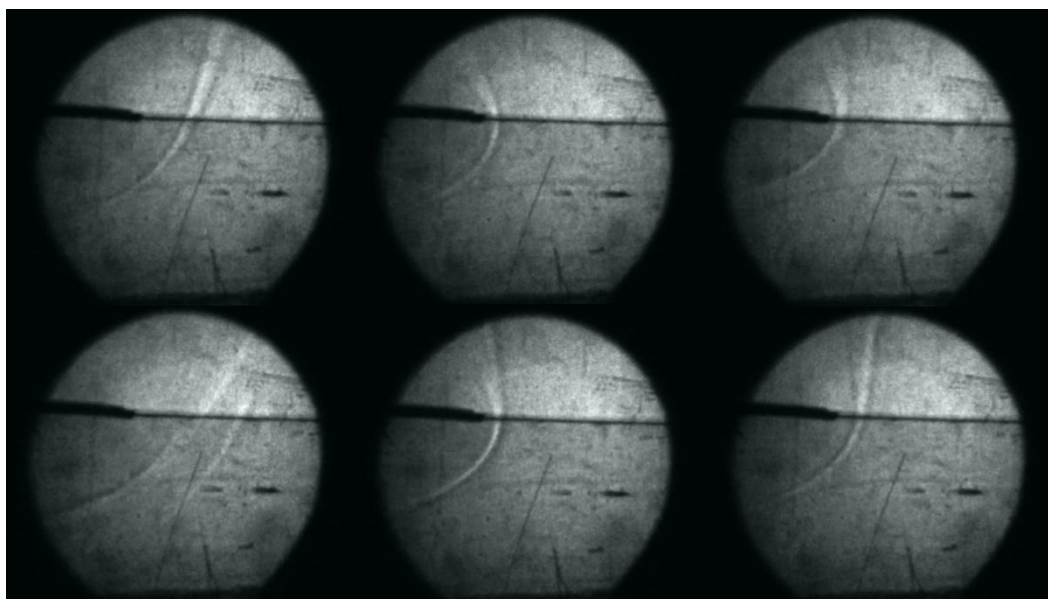


Рисунок 3.4 - Срыв потока воздуха с края козырька, установленного над щелевой неплотностью укрытия, вид сбоку

На рисунке 3.5 строится зависимость величины δ (3.5) отклонения к.м.с. неплотности с козырьком ζ_1 от к.м.с. без него ζ_0 от длины козырька $\bar{l} = l / B$, где l - длина козырька, м, B - ширина неплотности, м,

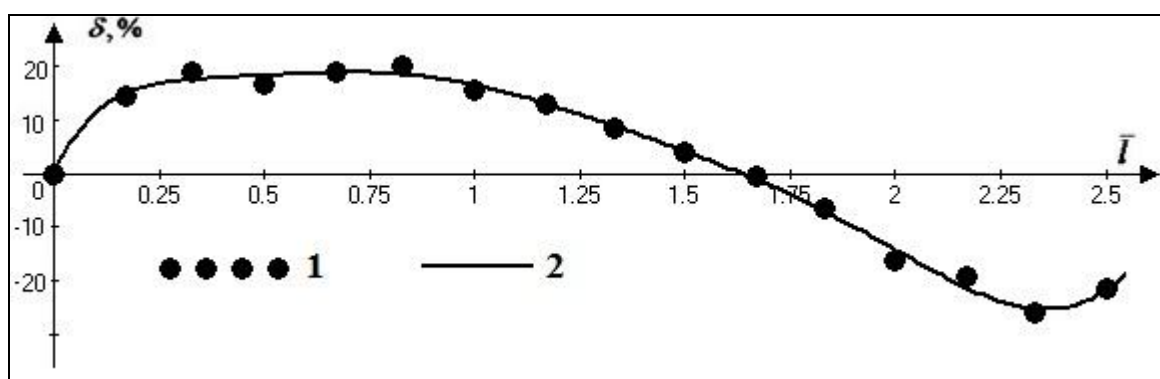


Рисунок 3.5 - Изменение величины δ в зависимости от $\bar{l} = l / B$ для щелевой неплотности, экранированной горизонтальным козырьком: 1- экспериментальные замеры; 2 – линия, построенная по формуле $\delta = (-0.1009324\bar{l}^8 + 1.147909\bar{l}^7 - 5.3352629\bar{l}^6 + 13.1315401\bar{l}^5 - 18.4841262\bar{l}^4 + 14.9807704\bar{l}^3 - 6.8678652\bar{l}^2 + 1.6918625\bar{l} - 6.9831684 \cdot 10^{-4}) \cdot 100\%$, полученной в результате регрессионного анализа

На рисунке 3.6 строится зависимость величины δ_G (3.7) отклонения массового расхода воздуха через щелевую неплотность с козырьком G_2 от массового расхода воздуха через щелевую неплотность без козырька G_1 от длины козырька $\bar{l}$.

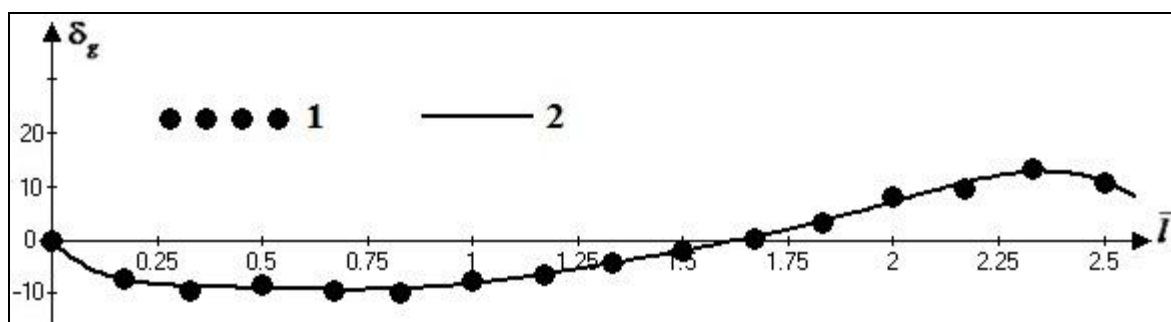


Рисунок 3.6 - Изменение величины δ_g в зависимости от $\bar{l} = l / B$ для щелевой неплотности, экранированной горизонтальным козырьком: 1- экспериментальные замеры; линия построенная в результате регрессионного анализа

Наибольший эффект дает козырек длиной 0,5-0,7 калибра. К.м.с. щелевой неплотности увеличивается более чем на 28%, а расход воздуха снижается на 11%. Это коррелируется с результатами, полученными в трудах [32, 50]. Основополагающее действие на увеличение к.м.с. оказывает явление отрыва воздушного потока (рисунок 3.4).

3.3.2 Исследование влияния механического экрана в виде пластины

Серия экспериментов по исследованию закономерностей развития вихревых структур на входе в щелевую неплотность аспирационного укрытия, оснащенную входной кромкой в виде козырька установленной длины, а также механическим экраном в виде прямоугольной пластины, в соответствии с рисунком 3.7.

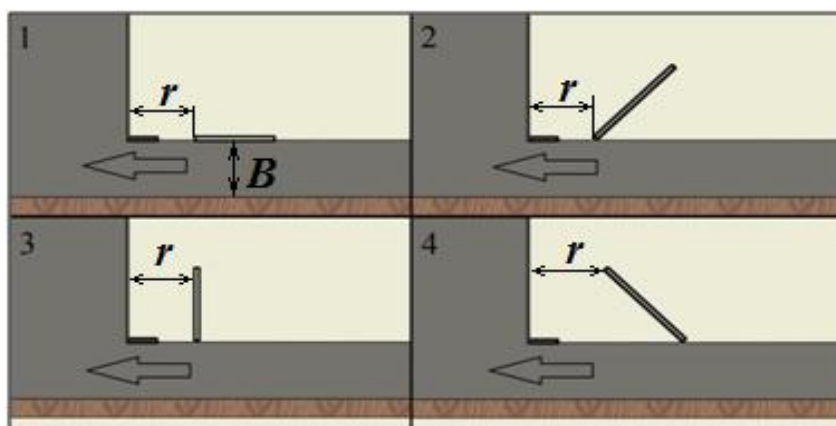


Рисунок 3.7 - Положения механического экрана в виде пластины

Постоянными в эксперименте являются: скорость вращения вытяжного вентилятора, длина (0,67 калибра) кромки в виде козырька над щелевой неплотностью аспирационного укрытия. Козырек устанавливается вплотную к коробу укрытия. Механический экран в виде прямоугольной пластины шириной 1,4 калибра устанавливается на направляющие после козырька, передвижение его осуществляется также по направляющим. Исследуются четыре принципиальных положения механического экрана в пространстве (рисунок 3.7) и удаления его от 0,67 до 2,67 калибров от щелевой неплотности. Отсчет удаления экрана ведется, начиная от плоскости щелевой неплотности, заканчивая ближайшей к ней гранью экрана, и так как между механическим экраном и входным отверстием присутствует козырек, отсчет начинается с некоторого значения, а не с нуля. Другие подсосы воздуха в эксперименте, помимо щелевой неплотности, отсутствуют, либо крайне незначительны и их воздействием можно пренебречь. Замеряемые величины:

- динамическое давление в трубе $P_{дин.изм}$,
- давление (статическое) разряжения в укрытии $P_{ст.укр.и}$
- температура среды $t_{изм}, ^\circ C$

Расчетные величины

- скорость V (м/с) потока воздуха в сечении 1-1 (3.3) (рисунок 3.2),
- к.м.с. щелевой неплотности (3.4),
- величина δ отклонения к.м.с. (3.5),
- массовый расход воздуха G (3.6),
- величина δ_G отклонения массового расхода воздуха (3.7).

Измеренные и расчетные величины представлены в таблице 2 приложения В.

На рисунке 3.8 для указанных на рисунке 3.7 положений экрана строится зависимость величины δ отклонения, в данном случае, к.м.с. неплотности с механическим экраном ζ_1 от к.м.с. без него ζ_0 , но с имеющимся в обоих случаях козырьком от расстояния $\bar{r} = r / B$.

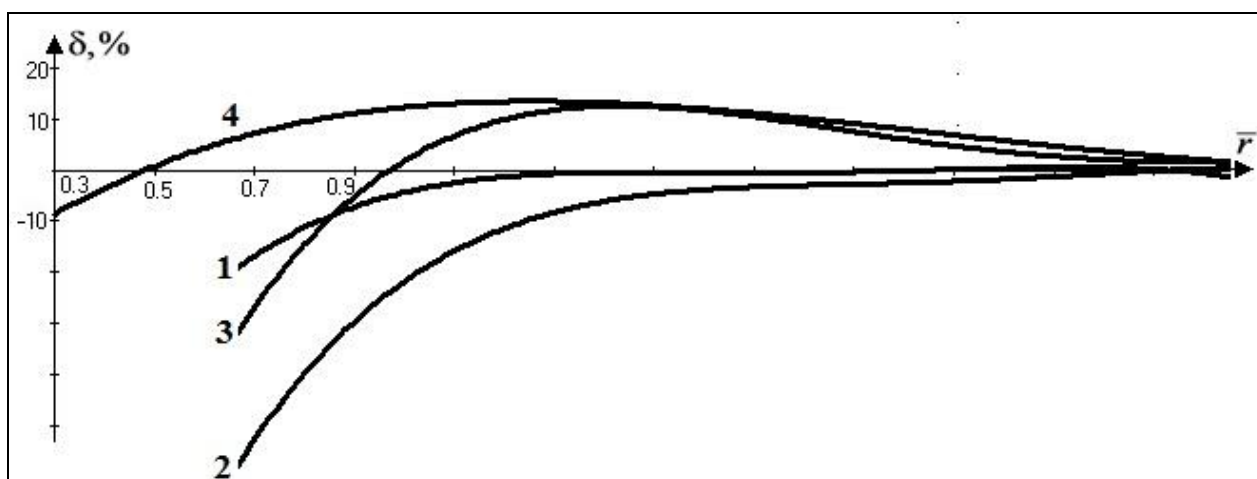


Рисунок 3.8 - Изменение величины δ в зависимости от $\bar{r}$ для щелевой неплотности, экранированной горизонтальным козырьком и экраном в виде пластины

На рисунке 3.9 для указанных на рисунке 3.7 положений экрана строится зависимость величины δ_G отклонения массового расхода воздуха G_2 для случая с механическим экраном от массового расхода воздуха G_1 без механического экрана, но с имеющимся в обоих случаях козырьком также от расстояния $\bar{r}$.

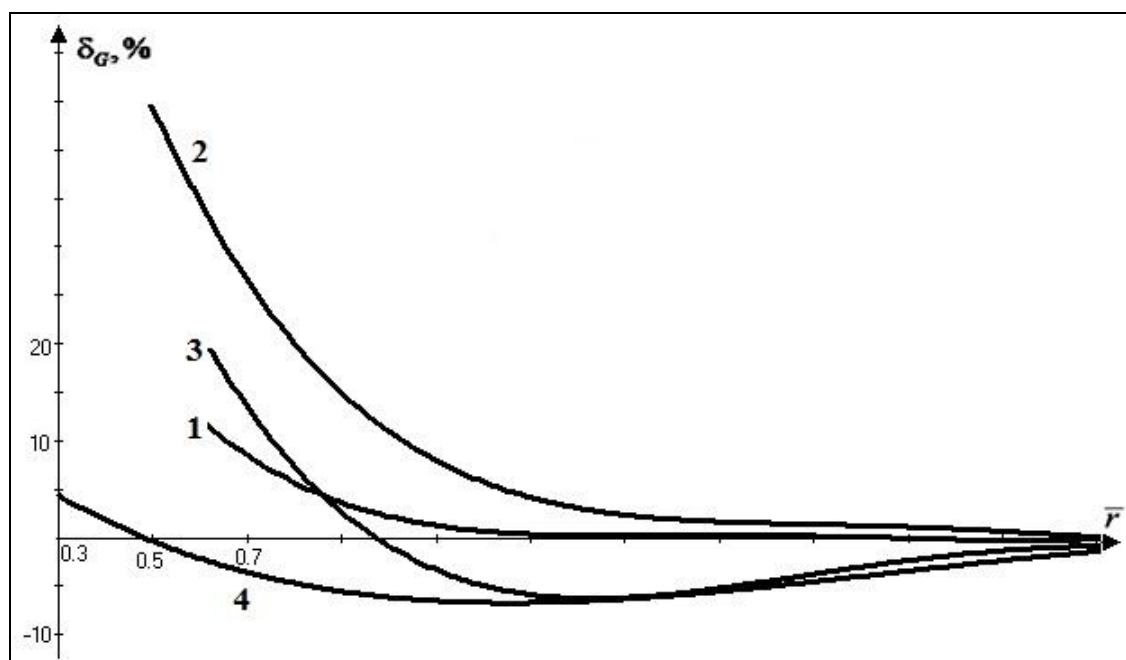


Рисунок 3.9 - Изменение величины δ_G в зависимости от $\bar{r}$ для щелевой неплотности, экранированной горизонтальным козырьком и экраном в виде пластины

Наибольший эффект дает расположение экрана в положении 4 (рисунок 3.7), при этом необходимым является условие сочетания его в комплексе с козырьком, установленной в предыдущем эксперименте длины. К.м.с. щелевой

неплотности при этом увеличивается более чем на 14% (рисунок 3.8), а расход воздуха снижается более чем на 6% (рисунок 3.9) при удалении пластины на $1,25 \pm 0,1$ калибра. Изменения показателей приведены в сравнении для случая неплотности, оборудованной козырьком и экраном в виде пластины, и случая неплотности, оборудованной только козырьком.

Стоит отметить снижение к.м.с. более чем на 50% при экранировании неплотности козырьком и пластиной в положении 2, установленной вплотную к козырьку, расход воздуха при этом увеличивается на 45%.

3.3.3 Исследование влияния механического экрана в виде прямого двугранного уголка

Серия экспериментов по исследованию закономерностей развития вихревых структур на входе в щелевую неплотность аспирационного укрытия, оснащенную входной кромкой в виде козырька установленной длины, а также механическим экраном в виде прямого двугранного уголка, в соответствии с рисунком 3.10. В ходе опытов исследуется влияние механического экрана в виде прямого двугранного уголка и его положения в пространстве относительно всасывающего щелевидного отверстия на аэродинамическое сопротивление входа укрытия.

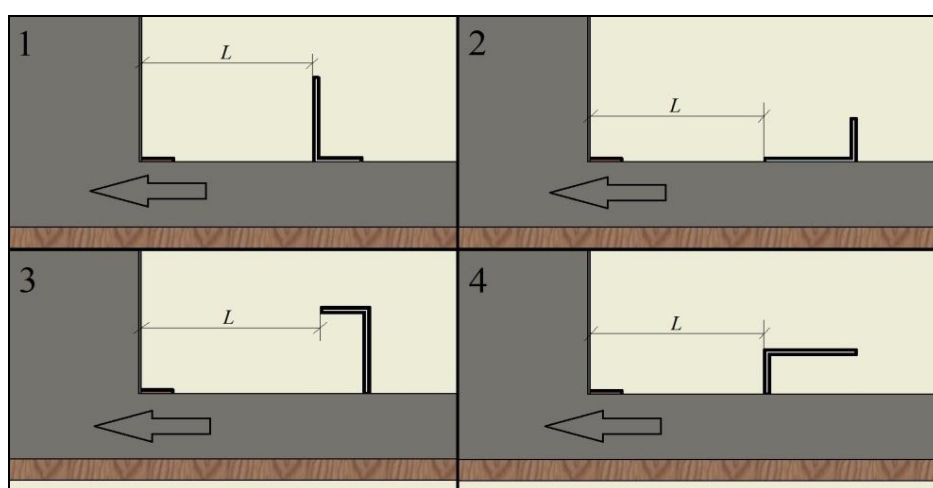


Рисунок 3.10 - Положения механического экрана в виде двугранного уголка

Постоянными в эксперименте являются: скорость вращения вытяжного вентилятора, длина (0,42 калибра) кромки в виде козырька над щелевым

отверстием прямоугольной формы. Козырек устанавливается вплотную к коробу укрытия. Другие подсосы воздуха, помимо щелевой неплотности, отсутствуют, либо крайне незначительны и их воздействием можно пренебречь. Механический экран устанавливается на направляющих сразу же после козырька. Исследуются четыре принципиальных положения механического экрана в пространстве (рисунок 3.10) и удаления его от 0,25 до 2,42 калибров от щелевой неплотности. Отсчет удаления экрана ведется, начиная от неплотности укрытия заканчивая ближайшей к ней гранью экрана, а так как между механическим экраном и неплотностью присутствует козырек, отсчет начинается с некоторого значения, а не с нуля. В этой серии экспериментов исследовались два аэродинамических экрана в виде прямого двугранного уголка с размерами сторон уголка: $0,83 \times 0,67$ и $1,4 \times 0,67$ калибров.

Замеряемые величины:

- динамическое давление в трубе $P_{дин.изм}$
- давление (статическое) разрежения в укрытии $P_{ст.укр.и}$
- температура среды $t_{изм}, ^\circ C$

Расчетные величины

- скорость V (м/с) потока воздуха в сечении 1-1 (3.3) (рисунок 3.2),
- к.м.с. щелевой неплотности (3.4),
- величина δ отклонения к.м.с. (3.5),
- массовый расход воздуха G (3.6),
- величина δ_G отклонения массового расхода воздуха (3.7).

Измеренные и расчетные величины представлены в таблице 3 и 4 приложения В.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 3.11 – 3.14 в виде зависимостей величин δ и δ_G от $\bar{L}$.

Для указанных на рисунке 3.10 положений экрана двух разных размеров строятся зависимость величины δ отклонения, к.м.с. неплотности с экраном в виде двугранного уголка ζ_1 от к.м.с. без него ζ_0 , но с имеющимся в обоих

случаях козырьком от расстояния $\bar{L} = L / B$, где L - расстояние до экрана, м, B - ширина неплотности, м, и зависимость величины δ_G отклонения массового расхода воздуха G_2 для случая с экраном в виде двугранного уголка от массового расхода воздуха G_1 без экрана, но с имеющимся в обоих случаях козырьком также от расстояния $\bar{L}$.

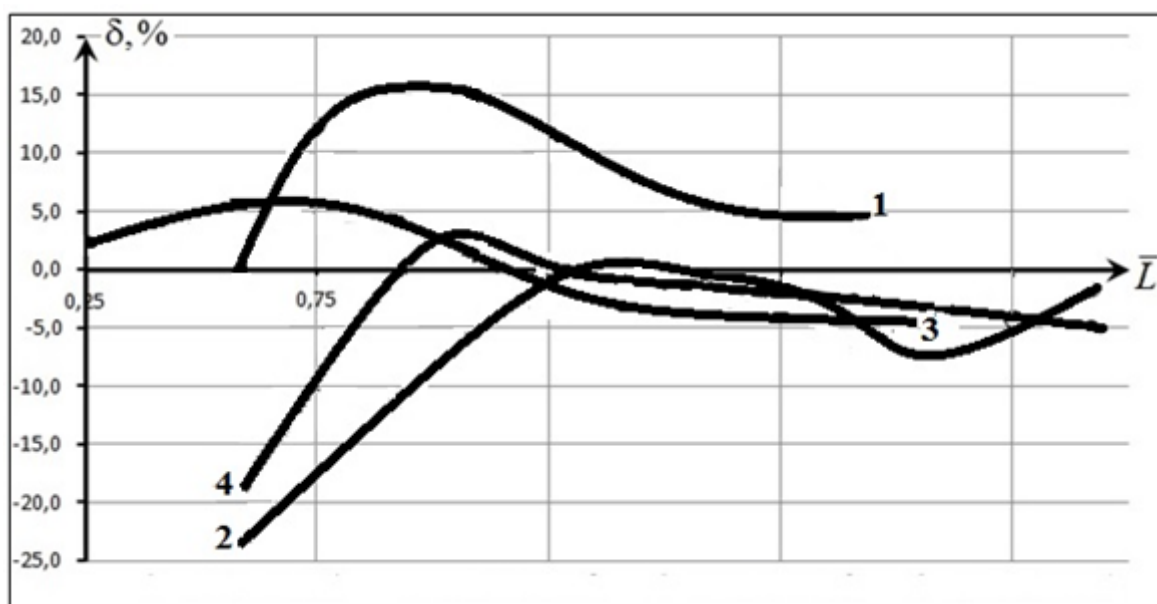


Рисунок 3.11 - Изменение величины δ в зависимости от $\bar{L}$ для щелевой неплотности, экранированной козырьком и двугранным уголком $0,83 \times 0,67$

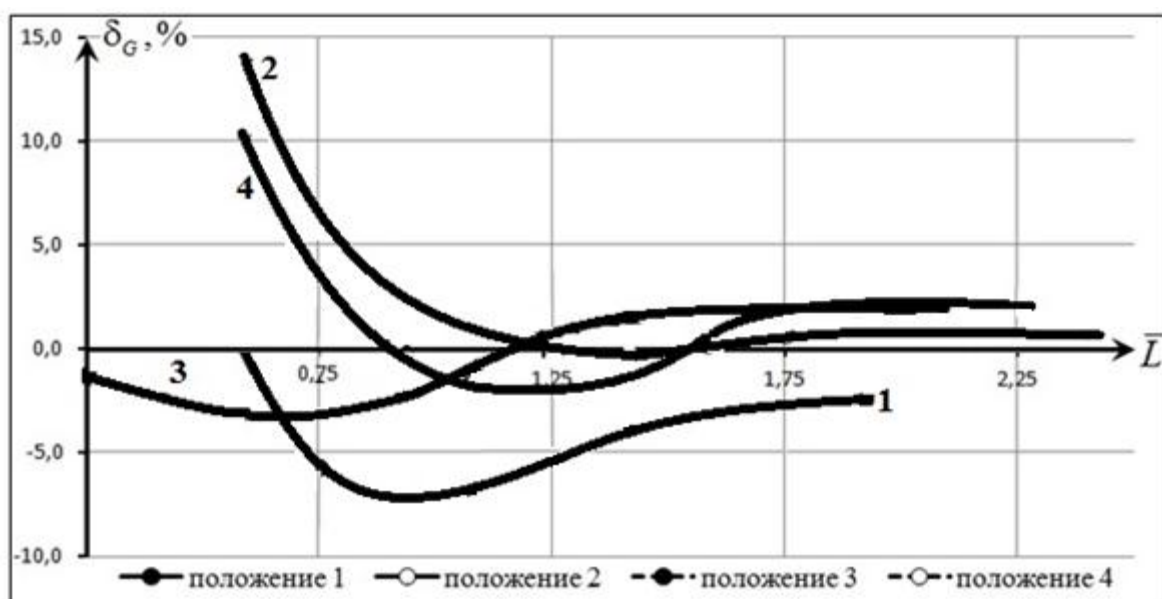


Рисунок 3.12 - Изменение величины δ_G в зависимости от $\bar{L}$ для щелевой неплотности, экранированной козырьком и двугранным уголком $0,83 \times 0,67$

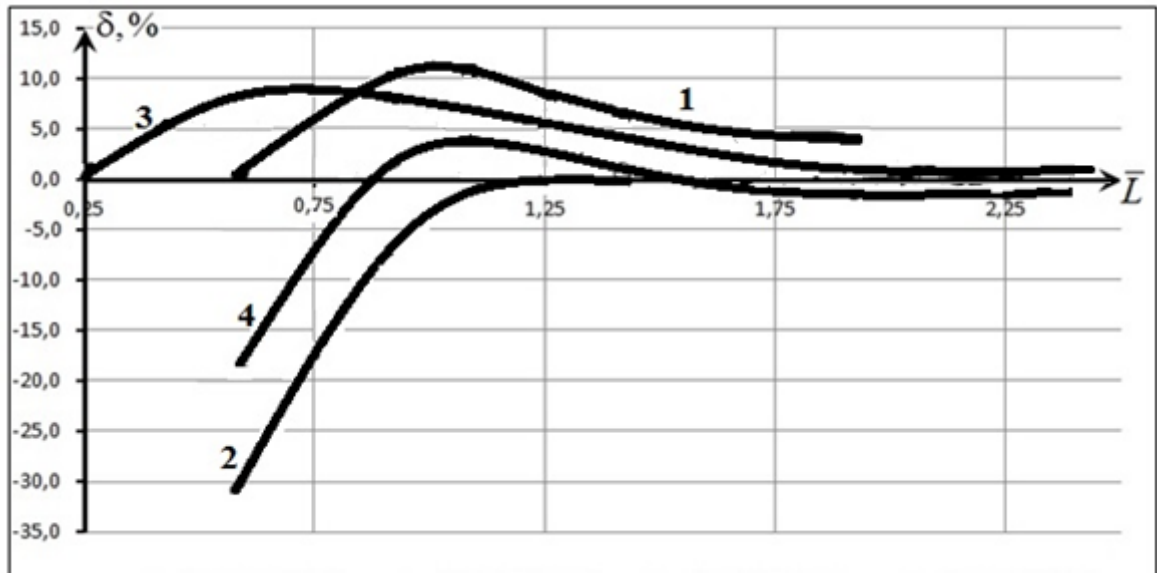


Рисунок 3.13 - Изменение величины δ в зависимости от $\bar{L}$ для щелевой неплотности, экранированной козырьком и двугранным уголком $1,4 \times 0,67$

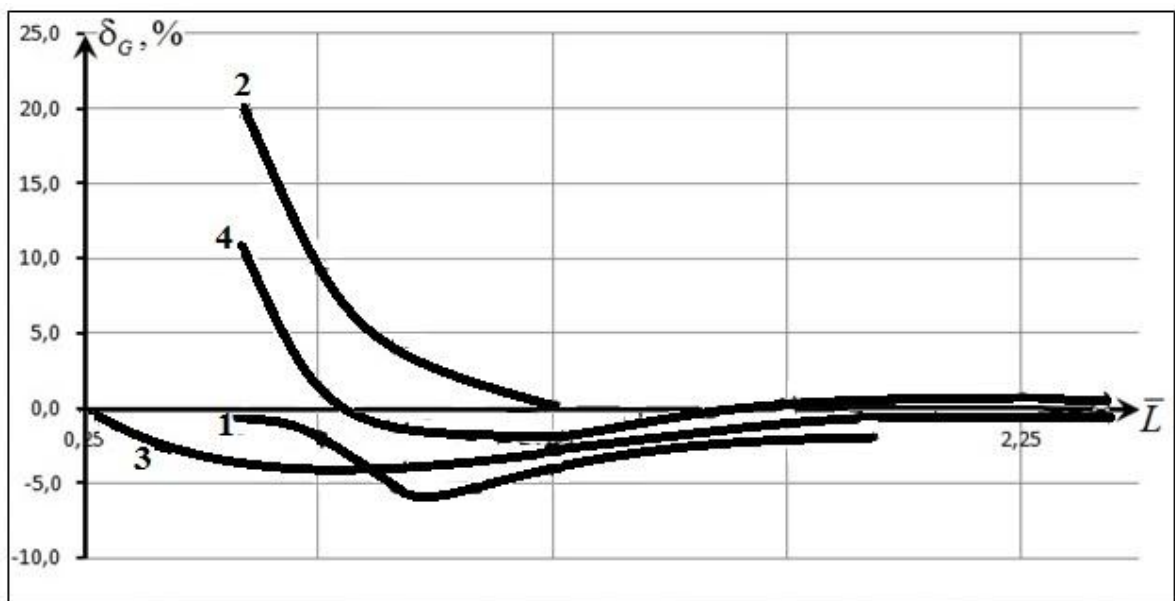


Рисунок 3.14 - Изменение величины δ_G в зависимости от $\bar{L}$ для щелевой неплотности, экранированной козырьком и двугранным уголком $1,4 \times 0,67$

Экранирование неплотности козырьком и двугранным уголком в положении 1 наиболее благоприятствует повышению к.м.с. щелевой неплотности и снижению расхода воздуха при удалении экрана на 0,8–1,2 калибра. При этом повышение к.м.с. достигает 15%, снижение расхода воздуха 7%.

3.3.4 Определение размеров и положения в пространстве механического экрана в виде прямого двугранного уголка

В этой серии экспериментов осуществляется подбор размеров и удаленности механического экрана в виде прямого двугранного уголка (рисунок 3.15), при которых достигается максимальное увеличение к.м.с. щелевой неплотности аспирационного укрытия. В предыдущей серии опытов было выяснено, что наибольшее повышение к.м.с. щелевой неплотности происходит при установке экрана в виде двугранного уголка в положении 1 (рисунок 3.10 – 3.14), при этом положительные значения величины δ отклонения к.м.с. соответствовали удалению экрана в пределах двух калибров от неплотности.

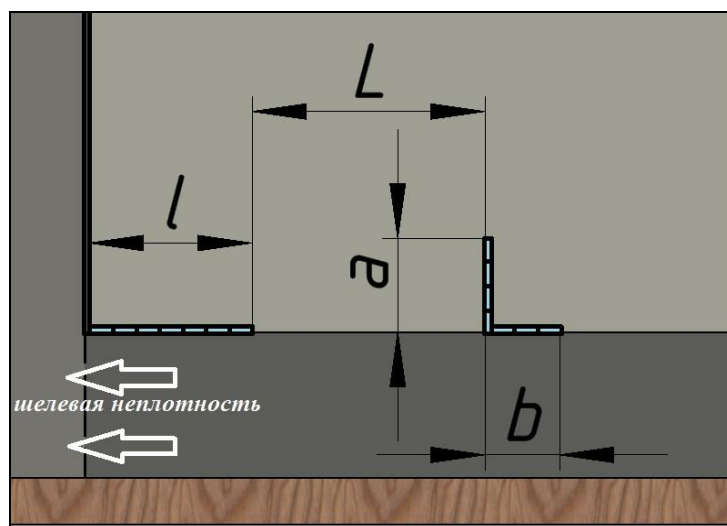


Рисунок 3.15 – Схема расположения козырька и экрана в виде уголка

Постоянными в эксперименте являются: скорость вращения вытяжного вентилятора, длина (1 калибр) кромки в виде козырька над щелевой неплотностью. Козырек устанавливается вплотную к коробу укрытия. Механический экран в виде прямого двугранного уголка представляет собой сборную единицу, состоящую из длинных металлических пластин толщиной 1 мм, шириной 10 мм, плотно прилегающих друг к другу и скрепленных посредством магнитной ленты. Механический экран в виде прямого двугранного уголка имеет два измерения: a – длина вертикальной стороны уголка, b – длина горизонтальной стороны. Подбор длин сторон осуществляется в интервале от 0,17

до 1 калибра. Перемещение и оценка удаления механического экрана от щелевой неплотности осуществляются так же, как и в предыдущей серии опытов. Подсосы воздуха, помимо щелевой неплотности, отсутствуют, либо крайне незначительны и их воздействием можно пренебречь.

Замеряемые величины:

- динамическое давление в трубе $P_{дин.изм}$
- давление (статическое) разряжения в укрытии $P_{ст.укр.и}$
- температура среды $t_{изм}, ^\circ C$

Расчетные величины

- скорость V (м/с) потока воздуха в сечении 1-1 (3.3) (рисунок 3.2),
- к.м.с. щелевой неплотности (3.4),
- величина δ отклонения к.м.с. (3.5),
- массовый расход воздуха G (3.6),
- величина δ_G отклонения массового расхода воздуха (3.7).

Измеренные и расчетные величины представлены в таблице 5 приложения В.

На рисунке 3.16 изображены зависимости величины δ от расстояния до горизонтального козырька $\bar{r} = L / B$. Кривые 1 – 6 соответствуют величинам длины горизонтальной части уголка $n/B = 1/6; 1/3; 1/2; 2/3; 5/6; 1$.

При $m/B = 1/6$, $n/B = 1/6 - 1$ (рисунок 3.16 а) снабжение щелевой неплотности с горизонтальным козырьком экраном в виде уголка не способствует повышению к.м.с., а напротив снижает его. Исключение составляют экспериментальные замеры при $n/B = 1/2$ и $\bar{r} = 0,17$ калибра (кривая 3) и при $\bar{r} > 1,5$ калибра для кривых 2 и 4. Увеличение к.м.с в этом случае достигает $\delta = 2\%$. При увеличении размеров уголка величина δ изменяется более существенно. Максимальное увеличение величины δ достигает: 7% при $m/B = 1/3$, $n/B = 1/6$ в диапазоне $\bar{r} = 0,3 - 0,5$ калибра (кривая 1 рисунок 3.16 б); 11% при $m/B = 1/2$, $n/B = 1/6$, $\bar{r} = 0,5$ калибра (кривая 1 рисунок 3.16 с); 12% при $m/B = 2/3$, $n/B = 1/2$, $\bar{r} = 0,7$ калибра (кривая 3 рисунок 3.16 d); 12% при $m/B = 5/6$, $n/B =$

1/6, в диапазоне $\bar{r} = 0,5 - 0,7$ калибра (кривая 1 рисунок 3.16 e); 12% при $m/B = 1$, $n/B = 1/6$, в диапазоне $\bar{r} = 0,5 - 0,7$ калибра (кривая 1 рисунок 3.16 f); 16% при $m/B = 1$, $n/B = 1/2$, в диапазоне $\bar{r} = 0,5 - 0,9$ калибра (кривая 3 рисунок 3.16 f).

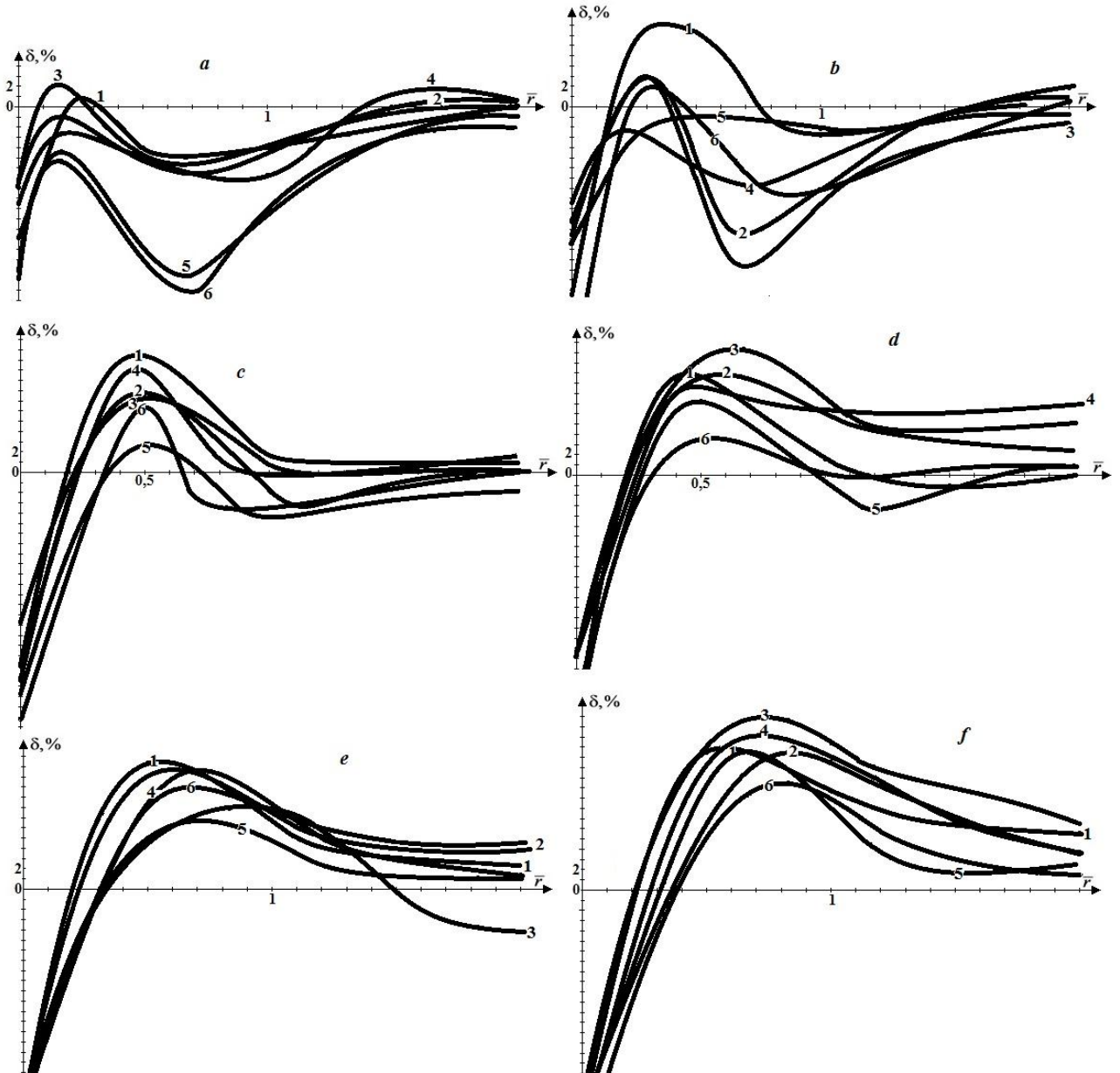


Рисунок 3.16 - Изменение величины δ от $\bar{r} = L / B$: а) $m/B = 1/6$; б) $m/B = 1/3$; в) $m/B = 1/2$; д) $m/B = 2/3$; е) $m/B = 5/6$; ф) $m/B = 1$

Полученные максимумы на рисунке 3.16 объясняется достижением, при данном расположении экранирующих козырьков, наибольших величин объема отрывной области и потерь энергии.

В результате экспериментов было выяснено, что при установке на входе в щелевую неплотность горизонтального козырька и экрана в виде уголка с

высотой равной 1 калибру и шириной 0,5 калибра, при удалении его от козырька на 0,5-1 калибра к.м.с. увеличивается на величину более 16,6%. Максимальная величина отклонения к.м.с. $\delta \approx 45\%$ при оборудовании неплотности горизонтальным козырьком и экраном в виде уголка, при этом расход воздуха через неплотность снижается на $\approx 17\%$

Анализ полученных данных позволил установить параметры аэродинамических приспособлений для достижения максимального увеличения к.м.с. на входе в щелевой проем, что позволяет добиться большего снижения подсоса воздуха через щелевой проем. Исходя из найденных параметров, было разработано устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем, в соответствии с рисунком 3.17.

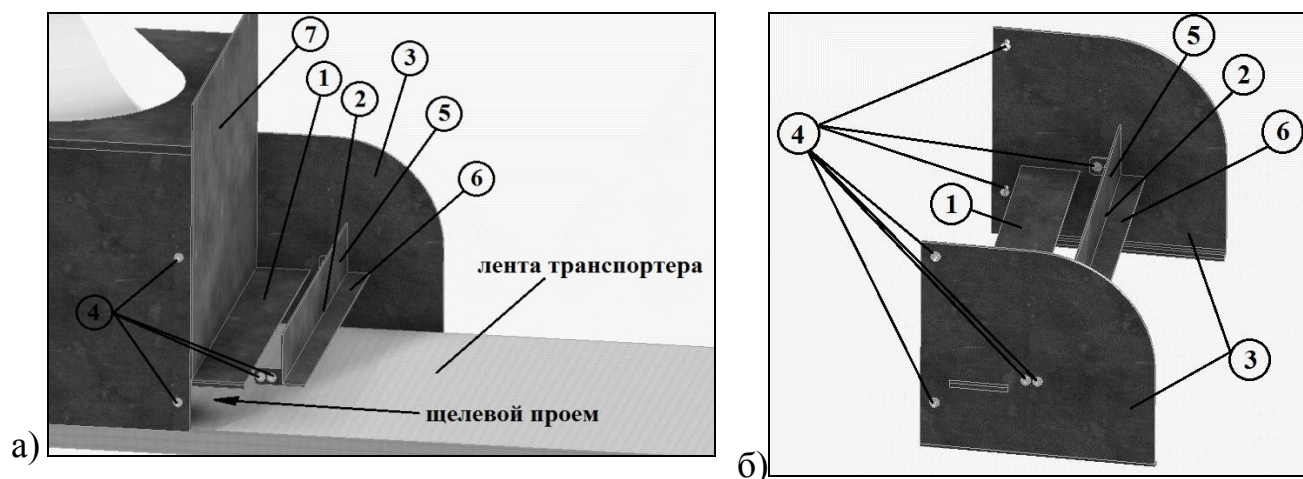


Рисунок 3.17 – Устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем: а) – общий вид, б) – установленное на аспирационное укрытие

Устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем содержит козырек 1, механический экран 2 в виде прямого двугранного уголка. Козырек 1 и механический экран 2 по длине равны 1 калибру и жестко соединены с обоих концов стабилизирующими поток воздуха стенками 3 болтовым соединением 4. Расстояние между механическим экраном 2 и козырьком 1 равно от 0,5 до 1,1 ширины щелевого проема. Стенка аспирационного укрытия 7 и лента транспортера образуют между собой щелевой проем. Для достижения максимального снижения подсоса воздуха через щелевой проем предлагается соблюдать следующие размерные соотношения. Ширина козырька должна

составлять от 0,5 до 1,0 калибра. Ширина короткой грани механического экрана должна быть равна от 0,15 до 0,35 калибра, ширина длинной грани механического экрана должна находиться в пределах от 0,65 до 1,1 калибра. Длина и ширина стабилизирующих стенок должны быть равны между собой и по величине быть больше 3,0 калибров.

Устройство работает следующим образом. При образовании разрежения, например, в аспирационном укрытии (рисунок 3.17 а) через щелевой проем, образованный стенкой аспирационного укрытия 7 и лентой транспортера, в него поступает атмосферный воздух. Наличие жестко закрепленного козырька 1 над открытым проемом под прямым углом к плоскости всасывающего отверстия создает эффект отрыва потока воздуха, образуется аэродинамически локализованная зона разрежения на внутренней поверхности козырька 1. В результате чего уменьшается площадь живого сечения всасывания воздуха, увеличивается гидравлическое сопротивление на входе, и, соответственно, уменьшается объем подсасываемого через щелевой проем воздуха. Наличие стабилизирующих стенок 3 позволяет стабилизировать этот эффект, исключая с двух сторон подсосы воздуха, которые разрушают локализованную зону разрежения под козырьком 1, направляя, тем самым, весь поток всасываемого воздуха на прохождение созданных преград. Жесткое соединение 4, выполненное в качестве примера болтовым соединением 4 позволяет зафиксировать детали устройства неподвижно относительно друг друга и щелевого проема. Механический экран 2 в виде прямого двугранного уголка находящийся на расстоянии от 0,5 до 1,1 калибра от козырька 1 позволяет еще более увеличить поджатие потока воздуха под ним, за счет увеличения локализованной зоны разрежения. При расстоянии, меньшем заявленного диапазона значений, будет происходить сужение локализованной зоны разрежения под козырьком, что приведет к увеличению подсоса воздуха через щелевой проем. При расстоянии, большем заявленного диапазона значений, механический экран перестает оказывать влияние на образующуюся под козырьком локализованную зону разрежения, вследствие чего не происходит ее увеличения. Короткая грань 6

механического экрана 2 приводит к созданию эффекта отрыва потока воздуха под экраном 2. Сопротивление для потока воздуха в этой части увеличивается, и часть воздуха направляется к всасывающему щелевому проему, проходя над механическим экраном 2. Длинная грань 5 также создает отрыв потока воздуха. В результате чего траектория движения части воздушного потока приобретает зигзагообразный характер. После прохождения механического экрана 2, два воздушных потока встречаются друг с другом под близким к прямому углом. Воздушный поток, который проходил над механическим экраном 2 сбивает поток, который прошел под ним, тем самым, прижимая его к поверхности ленты транспортера. Таким образом, локализованная зона разрежения под козырьком 1 увеличивается и при прохождении под козырьком потока воздуха происходит еще большее его поджатие. Живое сечение всасывания воздуха уменьшается, происходит снижение подсосов воздуха, при этом конструктивные размеры щелевого проема не изменяются.

В ходе экспериментов было обнаружено, что использование решетки из тех же металлических пластин размером $1 \times 10 \times 435 \text{ мм}$ общей длиной 0,7 калибра, наклоненных под углом 45° , расстояние между которыми 0,117 калибра (рисунок 3.18) приводит к увеличению к.м.с. на $\delta \approx 47\%$ и снижению расхода воздуха на $\delta_G \approx 18\%$ (к.м.с. входа в неплотность $\zeta_1 = 1,82$, $\zeta_0 = 1,24$).

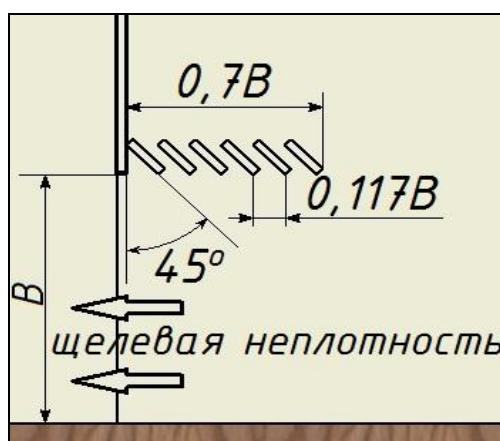


Рисунок 3.18 – Решетка из металлических пластин

Выводы по третьей главе

1. На разработанной экспериментальной установке аспирационного укрытия с щелевой неплотностью проведены экспериментальные исследования. Исследовалось влияние горизонтальных, вертикальных, двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в щелевую неплотность. Показано, что оборудование щелевой неплотности горизонтальным козырьком длиной 0,5 – 0,7 калибра и уголком высотой в 1 калибр и шириной 0,5 калибра на расстоянии до козырька в диапазоне 0,5 – 1 калибра позволяет снизить расход воздуха более чем на 17%.

2. Установлены параметры аэродинамических приспособлений для достижения максимального увеличения к.м.с. на входе в щелевой проем.

3. Исходя из найденных параметров разработано устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем.

4. Обнаружено, что использование решетки из металлических пластин размером $1 \times 10 \times 435 \text{ мм}$ общей длиной 0,7 калибра, наклоненных под углом 45° , расстояние между которыми 0,117 калибра, приводит к увеличению к.м.с. на $\delta \approx 47\%$ и снижению расхода воздуха на $\delta_G \approx 18\%$.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

4.1 Численное моделирование отрыва потока на входе в круглый всасывающий патрубок

Круглый патрубок является элементом многих технологических установок, в частности в местной вытяжной вентиляции используют круглые всасывающие зонты для улавливания пылегазовых выбросов, в авиационной технике используют круглые воздухозаборники, различные сопла и пробоотборники [90, 103] также имеют круглую форму. Поэтому исследование течений при всасывании или истечении из таких патрубков представляет значительный интерес для науки и техники. Истечению турбулентных струй посвящены десятки тысяч научных трудов, всасывающим факелам – значительно меньше. Учет отрыва потока на входе во всасывающие каналы приближает расчетные величины к данным эксперимента [16, 104]. Найденные очертания вихревых областей позволяют разрабатывать рекомендации о профилировании входных кромок патрубка и снижению его аэродинамического сопротивления [16, 15-18, 12]. Использование тонких профилей и экранов позволяет, за счет эффекта струи, снизить объемы воздуха, поступающего в системы аспирации [35, 68]. Для численных исследований отрывных течений хорошо зарекомендовал себя метод дискретных вихрей [87-89, 17, 18, 20]. В работах [9, 35, 45] использовалась стационарная, а в трудах [87-89, 15, 17-20] нестационарная постановка задачи для расчета отрывных течений на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы. В этих работах в качестве дискретных вихревых особенностей использовались бесконечно тонкие прямолинейные вихревые шнуры и кольцевые вихри. В данной работе для построения дискретной модели к этим вихревым элементам добавляются многоугольные вихревые рамки, что позволит перейти к решению трехмерных задач о всасывающих факелах с учетом отрыва потока. Целью параграфа является разработка и исследование различных методов

математического моделирования отрывных течений на входе в круглую всасывающую трубу с использованием кольцевых и многоугольных дискретных вихревых особенностей.

4.1.1 Осесимметричная задача в стационарной постановке

Рассмотрим область течения (рисунок 4.1) на входе в круглый всасывающий канал. С острой кромки C происходит срыв потока и образуется свободная поверхность тока. Необходимо определить ее положение, скорость потока в любой заданной точке.

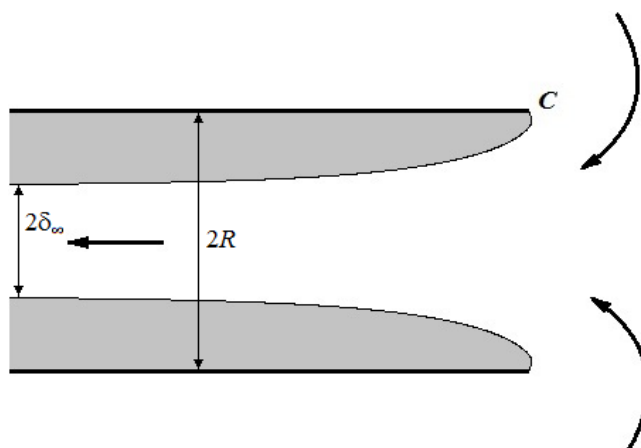


Рисунок 4.1 - Отрывное течение на входе в круглую трубу в меридиональной плоскости

Математическая постановка задачи состоит в решении двумерного уравнения Лапласа для потенциальной функции φ :

$$\Delta\varphi = 0,$$

при заданных значениях граничной нормальной составляющей скорости

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = v_n(x) - U_n,$$

где x – точка границы S . Функция U_n выражает влияние свободных вихрей, находящихся на свободной поверхности тока, положение которой заранее неизвестно.

Данное уравнение сводится к граничному сингулярному интегральному уравнению:

$$\int_S G(x, \xi) \omega(\xi) ds(\xi) = v_n(x) - \mu \int_{\sigma} G(x, \xi) d\sigma(\xi),$$

где $\omega(\xi)$ – плотность циркуляции присоединенного вихревого слоя; $\mu = \text{const}$ – плотность циркуляции свободного вихревого слоя, непрерывно размещенного на поверхности σ , образующейся при срыве потока с острой кромки; ξ – произвольная точка границы S . Функция $G(x, \xi)$ численно равна величине скорости в точке $x(x_1, x_2)$ вдоль направления единичного вектора $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$, вызываемой вихрем единичной циркуляции, расположенной в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$.

Для осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} F(t) & \text{при } b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}} & \text{при } b = 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

$$2x_2\xi_2 = b > 0, \quad a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, \quad A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1],$$

$$F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad t = \frac{2b}{a+b}.$$

Моделирующий поверхность трубы вихревой слой заменяется бесконечно тонкими вихревыми кольцами с постоянной интенсивностью $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$ (рисунок 4.2). Вихрь, лежащий на острой кромке C , считается свободным, что следует из теоремы, изложенной в работе [86]: интенсивность присоединенного вихревого слоя в точке срыва потока равна нулю. Между присоединенными вихрями располагались контрольные точки. Введем обозначения: $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка расположения k -го присоединенного вихря; $x^p(x_1, x_2)$ – p -я контрольная точка. Тогда скорость в точке x^p , вдоль единичного направления $\mathbf{n}$, индуцированная вихрем $\Gamma(\xi^k)$, расположенного в точке ξ^k , определится из выражения $v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k)$.

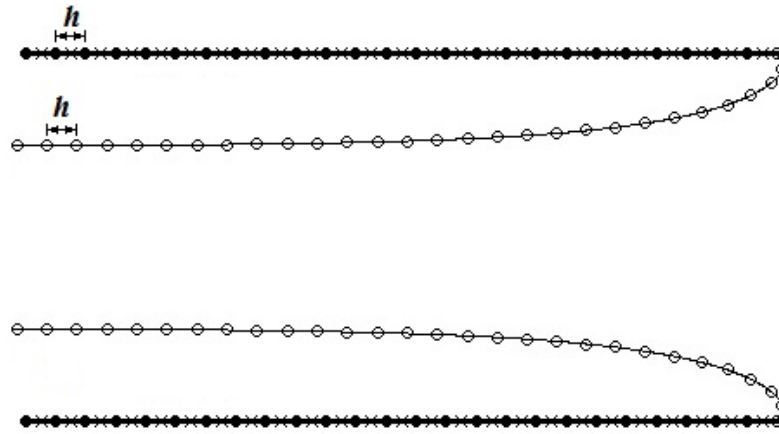


Рисунок 4.2 - Дискретная модель течения (крестики – контрольные точки; закрашенные кружочки – присоединенные вихревые кольца; кружочки – свободные вихревые кольца)

Полагалось, что на свободной поверхности тока, стекающей с кромки C , интенсивность вихрей постоянна и равна γ . Расстояние между свободными вихрями есть величина постоянная и равная h . Первое приближение для свободной линии тока выбиралось следующим образом. Первые 3 вихревых кольца располагались в плоскости входного проема канала начиная с острой кромки, при равномерном уменьшении радиуса с шагом h , остальные с постоянным радиусом и смещением их внутрь трубы с тем же шагом h .

Обозначим N – количество присоединенных вихрей; ζ^k – точка расположения свободного вихря; N_s – количество свободных вихрей, расположенных на свободной поверхности тока, срывающейся с острой кромки C .

Система линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных интенсивностей $\Gamma(\xi^q)$ присоединенных вихрей имеет вид:

$$\sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) = -\gamma \sum_{k=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^k), \quad (4.2)$$

где $p = 1, 2, \dots, N$.

После определения неизвестных циркуляций $\Gamma(\xi^q)$, где $q = 1, 2, \dots, N$, скорость в любой точке $x(x_1, x_2)$ области вдоль любого заданного направления вычисляется по формуле:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N G(x, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_S} G(x, \zeta^k).$$

На первой итерации, после определения неизвестных циркуляций вихрей, строится поверхность тока, стекающая с острой кромки. После того как она удаляется от всасывающего проема трубы на расстояние больше 10 калибров (калибр – радиус трубы), ее построение прекращается. Для построения поверхности тока интегрируется дифференциальное уравнение $dx/v_x = dy/v_y$. Построение поверхности тока начинается с острой кромки. Свободные кольцевые вихри располагают по этой поверхности равномерно с шагом равным h .

После определения второго приближения для свободных поверхностей тока необходимо снова решить систему уравнений (4.2) и определить циркуляции присоединенных вихрей. Затем строится третье приближение свободных поверхностей тока и т.д.

Данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения коэффициента сжатия струи δ_∞ / R всасывающего патрубка на предыдущей и последующей итерации не будут отличаться на величину заданной точности ε .

Если расстояние от точки до вихря меньше радиуса дискретности $h/2$, то скорость, вызываемая этим вихрем, определяется из следующего выражения:

$$v_n(x) = 8\pi \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{h^2}.$$

Пример расчета линий тока приведен на рисунке 4.3.

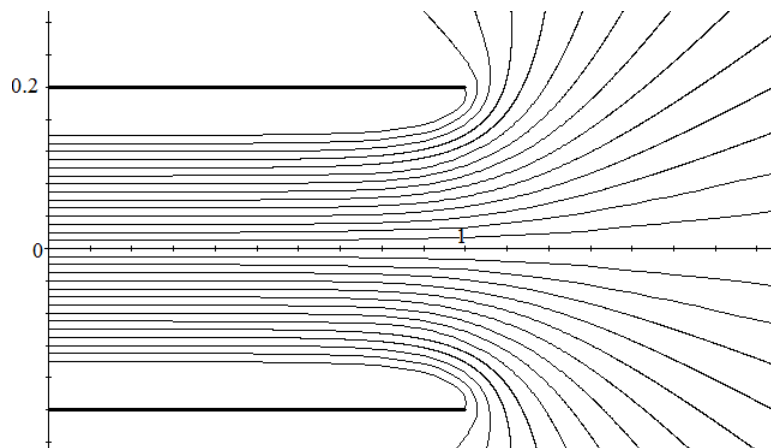


Рисунок 4.3 - Линии тока на входе в круглую трубу радиусом 0.2м

4.1.2 Осесимметричная задача в нестационарной постановке

В этом случае для дискретной модели границы добавляется всасывающее отверстие (рисунок 4.4) и производится дискретизация по времени с шагом Δt . Черные кружочки – присоединенные вихри, крестики - расчетные (контрольные) точки, полые кружочки - свободные вихри. Заметим, что здесь на оси симметрии расположен вихрь нулевого радиуса (в численном случае радиус получается почти нулевой). То есть по сути этого вихря нет.

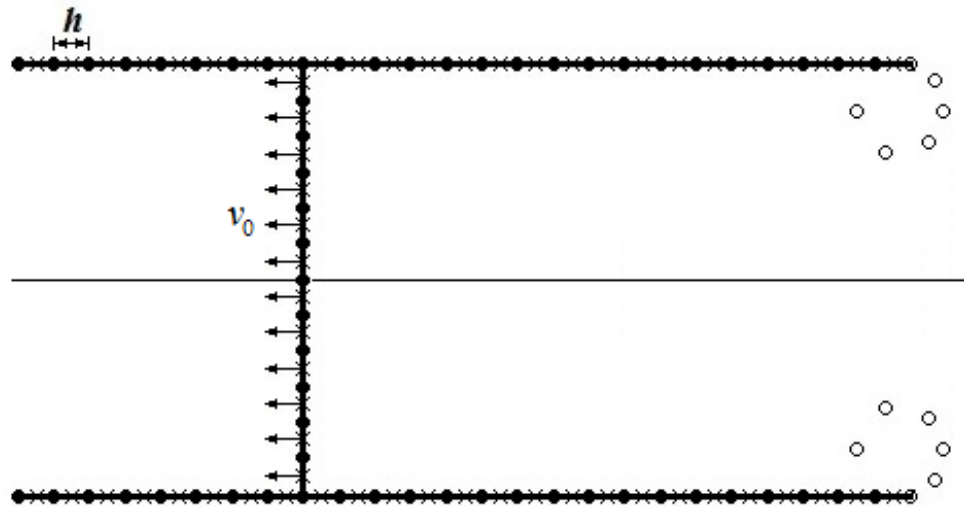


Рисунок 4.4 - Дискретная модель для нестационарной осесимметричной модели в меридиональной плоскости

Система уравнений для нахождения неизвестных интенсивностей присоединенных вихрей в момент времени $t = m\Delta t$ с использованием условия безциркуляционного течения имеет вид:

$$\begin{cases} v_n^p = \sum_{k=1}^n \Gamma^k G^{pk} + \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau} \gamma^\tau, \\ \sum_{k=1}^n \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m \gamma^\tau = 0, \end{cases}$$

где $v_n^p = v_n(x^p)$; $\Gamma^k = \Gamma(\xi^k)$; $G^{pk} = G(x^p, \xi^k)$; $G^{p\tau} = G(x^p, \xi^\tau)$; γ^τ - циркуляция свободного вихря, сходящего с острой кромки в момент времени τ и расположенного в точке ξ^τ ; $G^{p\tau}$ - функция влияния на p -расчетную точку вихря

γ^r и G^{pk} определяется по формуле (4.1). Из-за безциркуляционного течения система получается разрешимой. В момент начала она имеет вид:

$$\begin{cases} \Gamma^1 G^{11} + \dots + \Gamma^{n-1} G^{1,n-1} + \Gamma^n \cdot 0 = v_n^1, \\ \dots \\ \Gamma^{N-1} G^{N-1,1} + \dots + \Gamma^{N-1} G^{N-1,N-1} + \Gamma^{N-1} \cdot 0 = v_n^{N-1}, \\ \Gamma^1 + \Gamma^2 + \dots + \Gamma^{N-1} + \Gamma^N = 0. \end{cases}$$

Таким образом, данная система эквивалентна отбрасыванию вихря с нулевым радиусом и отбрасыванию условия безциркуляционного течения.

Заметим, что при расположении активного сечения (всасывающего сечения) между расчетными точками, получаются неадекватные результаты.

Таким образом, при расчете в каждый момент времени решением системы уравнений определяются неизвестные циркуляции присоединенных вихрей; рассчитываются следующие положения свободных вихрей используя формулы $x' = x + v_x \Delta t$, $y' = y + v_y \Delta t$ и осуществляется шаг по времени. Когда свободные вихри достигают активного сечения, производится удаление их из рассмотрения. Расчет ведется до тех пор, пока свободные вихри заполнят всю расчетную область (рисунок 4.5) и течение можно считать установившимся. Заметим, что и в этом случае величина скорости не становится постоянной, она пульсирует с течением времени, что позволяет определить турбулентные характеристики течения: продольные и поперечные пульсации скоростей (рисунок 4.6).

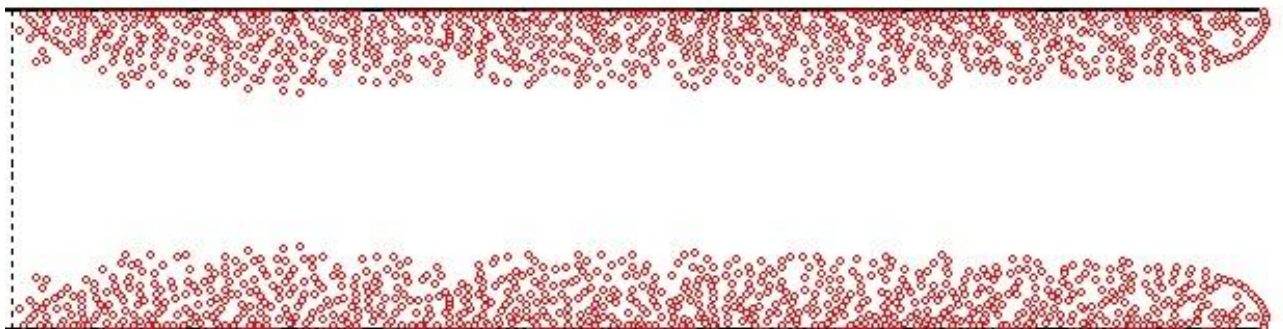


Рисунок 4.5 - Вихревая структура течения на входе в круглый патрубок радиусом 0.2м

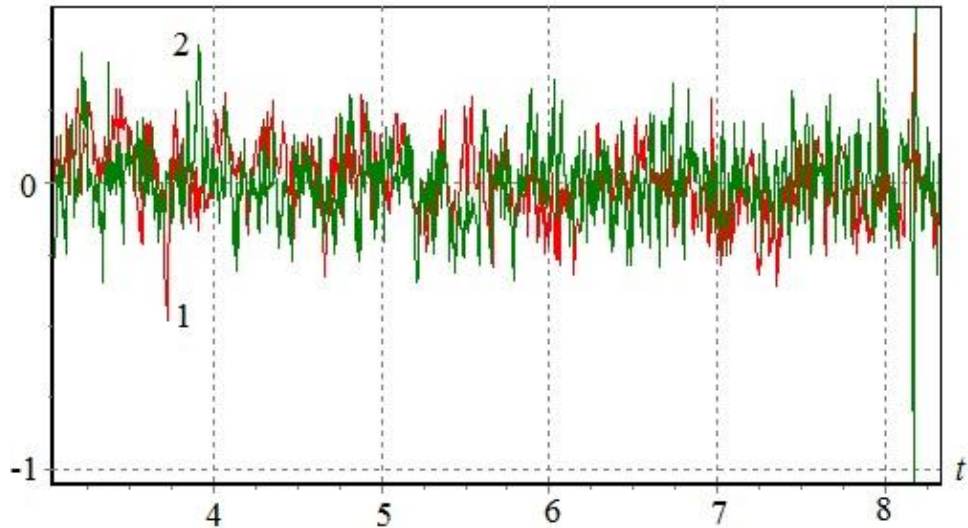


Рисунок 4.6 - Продольные (1) и поперечные (2) пульсации скорости вблизи стенки трубы

4.1.3 Квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке

Использование вихревых многоугольных рамок (рисунок 4.7) усложняет расчеты, но дает возможность решать трехмерные задачи.

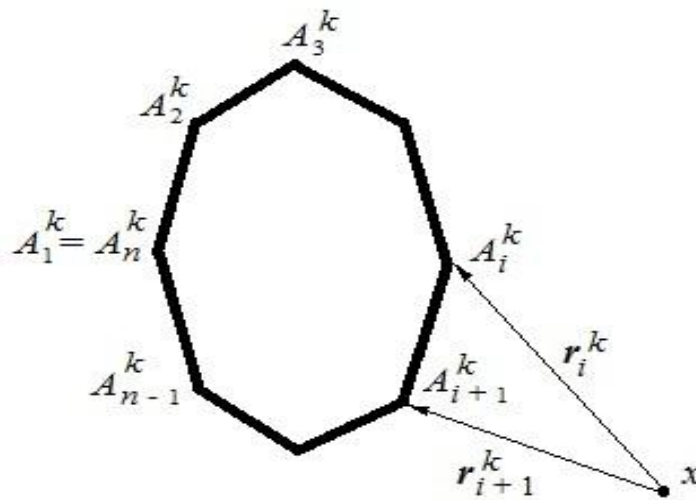


Рисунок 4.7 - К определению влияния на точку x k -й вихревой n -угольной рамки

Влияние на произвольную точку $x(x_1, x_2, x_3)$ k -й вихревой n -угольной рамки единичной интенсивности (рисунок 4.7) определяется из выражения:

$$G(x, k) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{[(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \times \mathbf{r}_i^k]}{|\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k|^2 |\mathbf{r}_i^k|^2 - ((\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_i^k)^2} \left(-\frac{(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_{i+1}^k}{|\mathbf{r}_{i+1}^k|} + \frac{(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_i^k}{|\mathbf{r}_i^k|} \right), \quad (4.3)$$

где $\mathbf{r}_i^k = \{A_{1i}^k - x_1, A_{2i}^k - x_2, A_{3i}^k - x_3\}$, $A_i^k(A_{1i}^k, A_{2i}^k, A_{3i}^k)$ - i -вершина k -й многоугольной рамки.

Тогда, индуцированная рамкой интенсивности $\Gamma(k)$, скорость $\mathbf{v}$ в точке $\mathbf{x}$ вдоль направления $\mathbf{n}$ вычисляется с помощью скалярного произведения:

$$v_n(\mathbf{x}) = (\mathbf{G}(\mathbf{x}, k) \cdot \mathbf{n}) \Gamma(k).$$

Далее будем обозначать $G^{pk} = (\mathbf{G}(\mathbf{x}^p, k) \cdot \mathbf{n})$, где как и прежде $\mathbf{x}^p$ - p -я контрольная точка. Контрольные точки располагаются посередине между многоугольными вихревыми рамками, по поверхности трубы или в центре треугольных и четырехугольных вихревых рамок, расположенных в активном сечении трубы (рисунок 4.8).

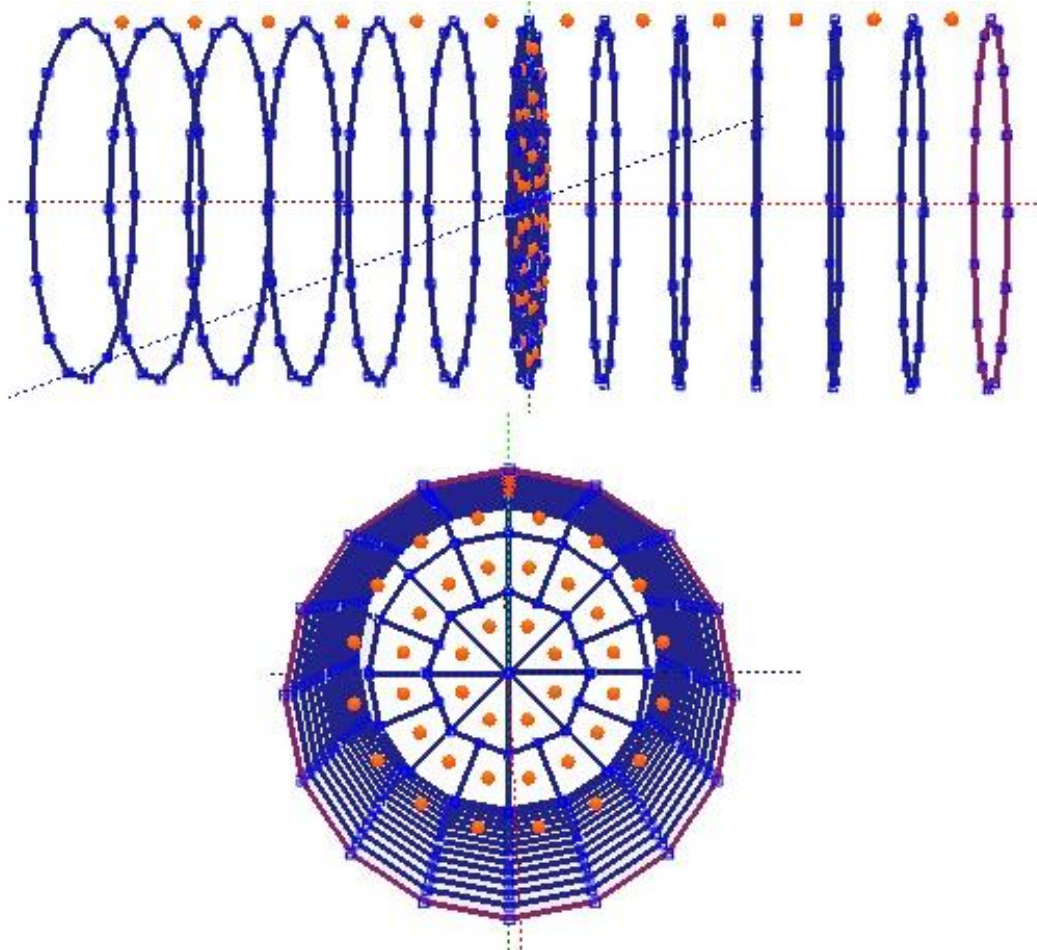


Рисунок 4.8 - Дискретная модель для квазиосесимметричной задачи

Заметим, что по всей рамке интенсивность Γ неизменна во всех точках вихревого многоугольника.

В момент времени $t = m \cdot \Delta t$ система для определения неизвестных интенсивностей присоединенных вихревых рамок преобразуется к виду:

$$\sum_{k=1}^N G^{pk} \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau} \gamma^{\tau} = v^p, \quad (4.4)$$

а проекция скорости в точке x на направление $\mathbf{n}$ определяется из следующего выражения:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G^k \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m G^{\tau} \gamma^{\tau}, \quad (4.5)$$

где G^k - функция влияния на т. x k -й вихревой рамки, Γ^k - ее циркуляция, G^{τ} - функция влияния на точку x вихревой рамки в момент времени τ сошедшей с острого края.

В следующий момент времени происходит срыв новых вихрей, предыдущие сдвигаются в направлении потока, определяются неизвестные интенсивности присоединенных вихрей из решения системы (4.4) и т.д., пока не достигается заданная цель.

Новое положение вершины свободной рамки определяется из формулы

$$x' = x + v_x \cdot \Delta t, \quad y' = y + v_y \cdot \Delta t, \quad z' = z + v_z \cdot \Delta t,$$

где (x, y, z) – координаты ее предыдущего положения, $\{v_x, v_y, v_z\}$ - координаты вектора скорости в данной точке (определяются при помощи формул (4.3), (4.5) в проекции на направления $\vec{n} = \{1, 0, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 1, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 0, 1\}$ соответственно).

В случае расположения некоторой точки на расстоянии меньшем радиуса дискретности от вихревой рамки, влияние последней на эту точку не учитывается. В каждый модельный момент времени в воздушный поток будет срываться вихревая рамка с циркуляцией, равной циркуляции вихревой рамки, расположенной на острой кромке вытяжного отверстия. Циркуляция данной вихревой многоугольной рамки с течением времени не изменяется, в отличие от ее расположения.

4.1.4 Результаты расчета и их обсуждение

Для проверки адекватности и достоверности рассмотренных моделей был произведен расчет осевой скорости в зависимости от расстояния до входа во всасывающее отверстие. Сравнение производилось с экспериментальными данными Alden J.L. [105] и расчетами по эмпирической формуле В.Н.Посохина [12]:

$$v = 1.1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0.655 / x^2}} \right).$$

Удаленность x обезразмеривалась путем деления на радиус трубы; скорость делилась на среднюю скорость во всасывающем канале.

Во всех моделях радиус трубы 0.2м; длина трубы 2м; расстояние между соседними присоединенными вихрями равнялось 0.01м; шаг дискретности 0.005м. Практически полное совпадение с экспериментальными данными демонстрируют расчеты выполненные в рамках стационарной модели (кривая 5 на рисунке 4.9). Эта же модель с высокой точностью позволяет определить коэффициент сжатия струи и к.м.с. входа в трубу по формуле $\zeta = (1 - 1/(\delta_{\infty} / R)^2)^2$. Расчетное значение величины к.м.с. $\zeta \approx 1.08$ и отличается от экспериментального $\zeta = 1$ [83] на 8%. Эта особенность модели позволяет исследовать влияние различных экранов и профилей на величину ζ [68].

Несколько завышенные величины скорости дают расчеты в рамках нестационарных моделей (кривые 1-4). Все же ближе к эксперименту результаты решения задачи в квазиосесимметричной постановке (кривые 2, 4). Вихревая структура течения при этом (рисунок 4.10) имеет подобную структуру, что и для осесимметричной задачи в нестационарной постановке (рисунок 4.5): вблизи стенок трубы образуется возвратная область течения, что не улавливает стационарная модель.

Коэффициент сжатия всасываемой струи, и соответственно к.м.с. в рамках нестационарных моделей определить затруднительно. Поскольку форма

поверхности тока, сходящей с острой кромки трубы, пульсирует во времени. Но даже и при усреднении величины δ_∞ значение к.м.с. превышает экспериментальный более чем на 50%.

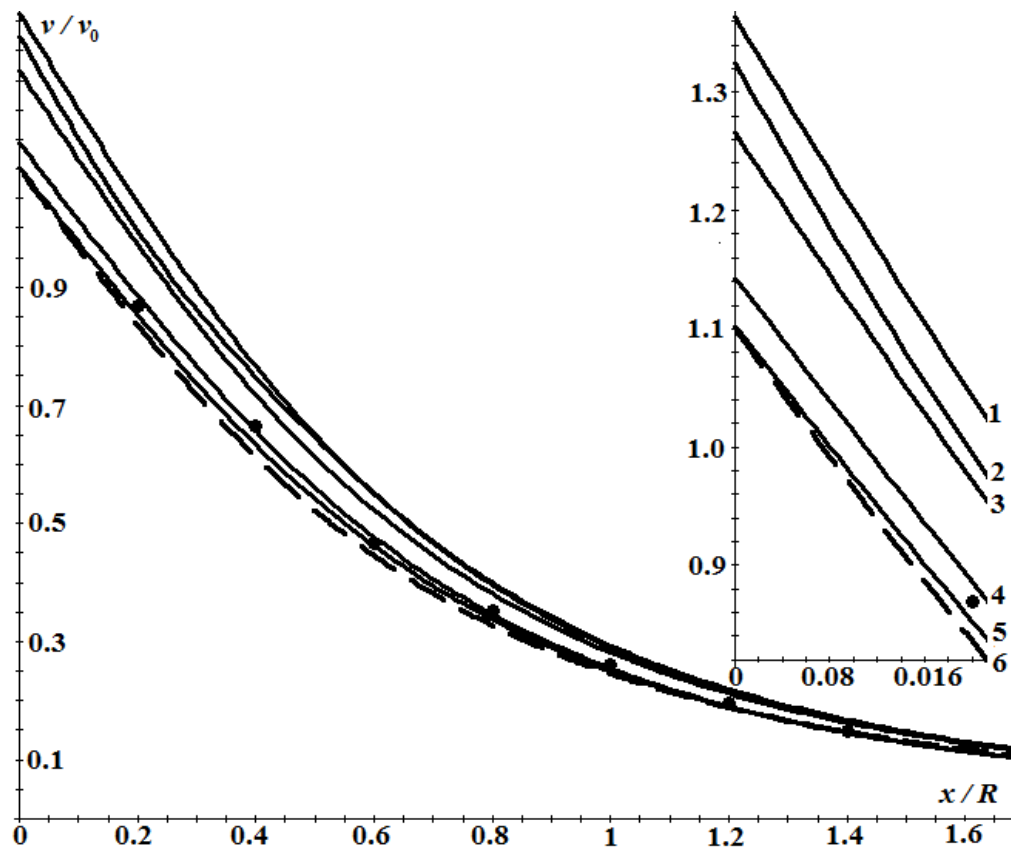


Рисунок 4.9 - Изменение безразмерной осевой скорости при удалении от входа в круглую трубу: 1-осесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0.005$; 2-квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0.005$; 3-осесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0.01$; 4-квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0.01$; 5- осесимметричная задача в стационарной постановке; 6-экспериментальная кривая В.Н.Посохина [12]; черные кружочки - экспериментальные данные [105]

Что касается времени счета, то квазиосесимметричная задача решается в несколько раз дольше, чем осесимметричные. Но есть возможность решать пространственные задачи в предположении, что границы течения других тел, находящихся в расчетной области, не оказывают существенного влияния на осевую симметрию течения в районе круглого патрубка. Разработанная программа позволяет и обратить течение, то есть исследовать течение приточной турбулентной струи (рисунок 4.11).

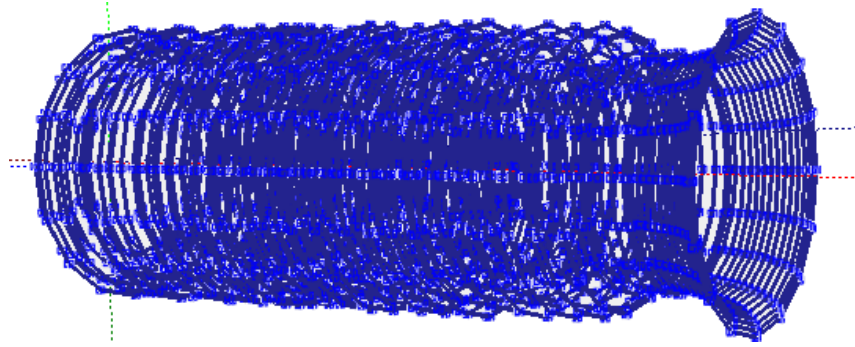


Рисунок 4.10 - Вихревая структура течения внутри трубы в момент времени 1.65 при шаге по времени 0.01 и шаге дискретности 0.005

В случае моделирования приточной струи структура течения (рисунок 4.11) коррелируется с расчетами А.В.Дворак и Н.В.Хлапова, изложенными в книгах [89, 106].

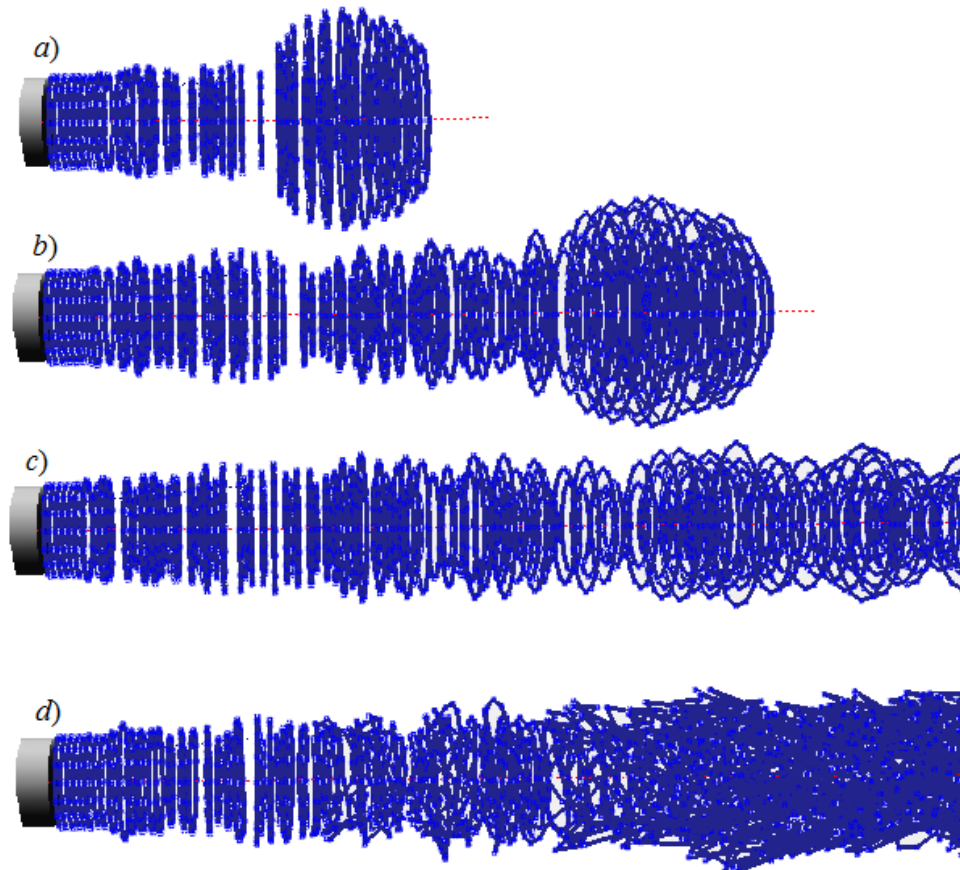


Рисунок 4.11 - Вихревая структура течения при истечении струи из трубы радиусом 0.1 при шаге дискретности 0.00495, расстоянии между соседними 16-угольными присоединенными вихревыми особенностями 0.01м и шаге по времени 0.03с: а) $t = 2.22$; б) $t = 4.14$; в) $t = 8.88$; д) $t = 12.36$

Осевая симметрия сохраняется до достаточно больших значений времени (рисунок 4.11 *a-c*). Вихревые многоугольники начинают образовывать вихревые сгустки, затем малейшие нарушения симметрии, вызванные ошибками округления, интенсивно нарастают, захватывая всю струю, за исключением начального участка струи (рисунок 4.11 *d*). Эта строгая осевая симметрия на начальном участке струи и всасываемого отрывного течения в трубе в определенной мере может являться обоснованием применимости квазиосесимметричного подхода для моделирования пространственных задач.

4.2 Моделирование отрыва потока на входе в квадратное всасывающее отверстие в неограниченном пространстве

Целью параграфа является построение математической модели отрыва потока на входе в квадратный всасывающий канал с острыми кромками, расположенный в неограниченном пространстве, с использованием квадратных вихревых рамок.

Задача состоит в определении поля скоростей в спектре действия квадратного полубесконечного патрубка (рисунок 4.12 *a*), при заданной скорости всасывания в сечении, удаленном на значительное расстоянии от входа в трубу. Во всем всасывающем сечении $ABCD$ скорость всасывания полагалась постоянной и равной v_0 . С острой кромки $EFMN$ происходит срыв потока. На стенках трубы выполняется условие непроницаемости.

Дискретная модель строится следующим образом (рисунок 4.12 *b*).

Стенки трубы дискретизируются на квадратные вихревые рамки (присоединенные вихри) и расчетные точки, где выполнены граничные условия непроницаемости для нормальной составляющей скорости. Эти точки расположены на стенке трубы посередине между вихревыми рамками. Всасывающее сечение тоже разбивается на квадратные вихревые рамки, в центре каждой из которых содержится расчетная точка, где нормальная составляющая скорости равна скорости всасывания v_0 .

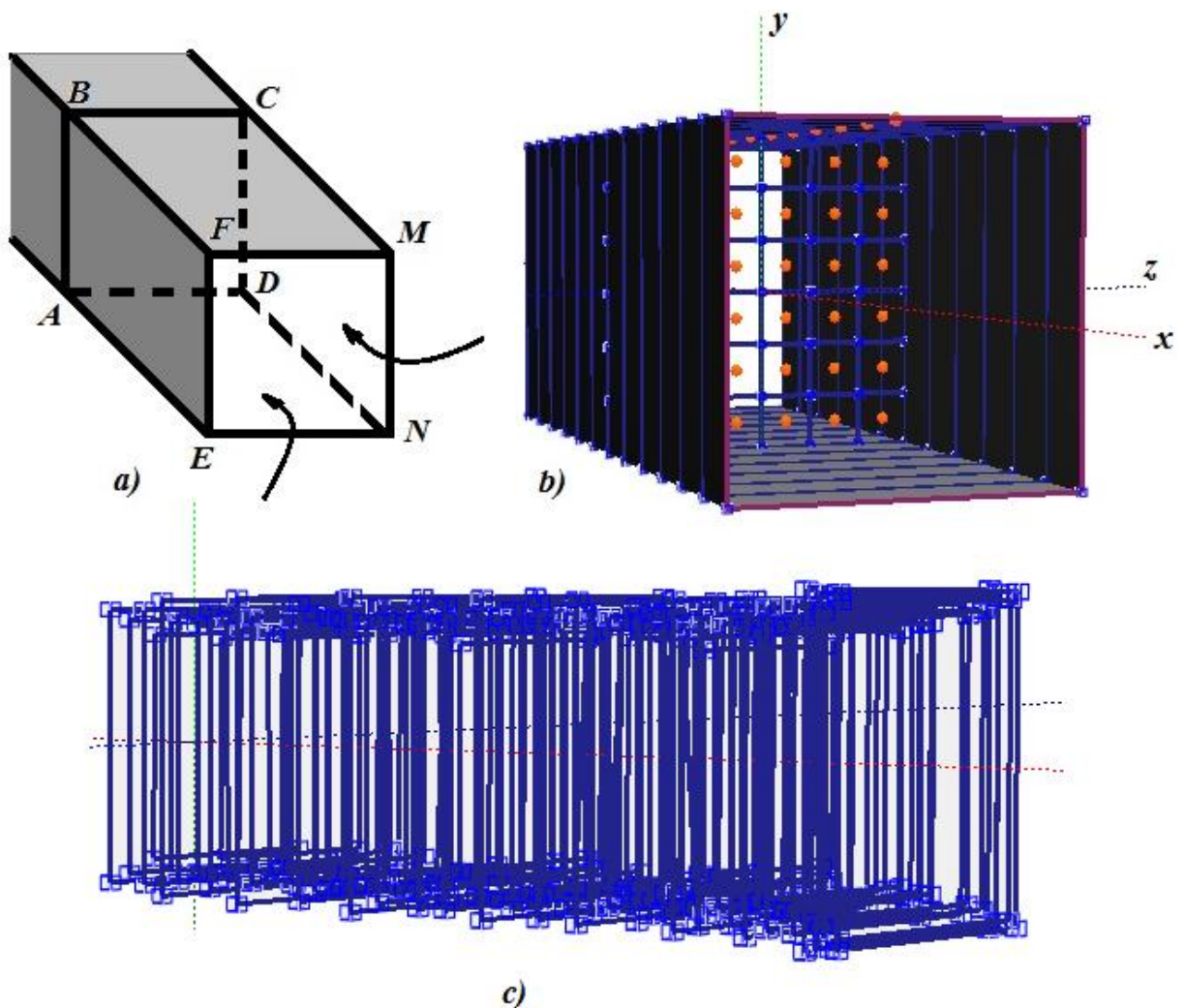


Рисунок 4.12 - Квадратный патрубок в неограниченном пространстве:

а) схема течения; б) дискретная модель; в) свободные квадратные вихревые рамки, полностью заполнившие область течения внутри трубы

Вычислительный алгоритм расчета изложен в п. 4.1.4.

Расчеты производились на входе в квадратную трубу размером $0.2\text{ м} \times 0.2\text{ м}$; длина трубы 1 м ; посередине трубы расположено активное сечение, дискретизируемое набором 100 квадратных рамок; поверхность трубы состояла из 100 квадратных присоединенных вихревых рамок (без рамки охватывающей активное сечение); радиус дискретности $h = 0.00495\text{ м}$; шаг по времени $\Delta t = 0.01\text{ с}$.

Сравнение величин осевой скорости воздуха (рисунок 4.13) показывает, что квадратное всасывающее отверстие менее дальнобойно, чем круглое. По оси ординат откладывались величины скорости, отнесенной к скорости всасывания v_0 . По оси абсцисс откладывалась величина удаленности от входа в трубу,

разделенное на радиус трубы a . Штрихпунктирная линия - это расчеты по формуле В.Н.Посохина для круглой трубы $v/v_0 = 1.1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0.655 / (x/a)^2}} \right)$.

Кружочки - это результаты опыта Alden J.L. (Alden J.L., Kane J.M. Design of Industrial Ventilation Systems. N.Y. Industrial Press, 1982) для круглой трубы.

Для квадратной трубы a - это половина стороны квадрата или все равно, что радиус окружности, вписанной в него. В этом случае сравнение происходит в одних и тех же точках. При равной скорости v_0 в отсосе имеем завышенные величины скорости (кривая 1) для квадратной трубы. Но такое сравнение не корректно, поскольку расход в такой трубе выше, чем у круглой на величину $a^2 v_0 (4 - \pi)$, где a - сторона квадрата. Поэтому значение скорости, найденное для квадратной трубы, следует относить к $(4/\pi)v_0$. В этом случае объемные расходы всасываемого воздуха будут одинаковы для круглой и квадратной трубы. Кривая 2 на рисунке 4.13 показывает, что значение осевой скорости на входе в квадратную трубу ниже, чем для круглой, это и свидетельствует о меньшей дальнобойности квадратного всасывающего отверстия. Заметим, что иногда в литературе заявляется о большей дальнобойности квадратной всасывающей трубы, но сравнение производится в разных точках. Удаленность от всасывающего отверстия измеряли в гидравлических радиусах: площади отверстия, отнесенной к периметру. Для круглого отверстия эта величина $a/2$, для квадратного $a/4$. В точке, лежащей ближе к отверстию, скорость, естественно, выше.

Профили скоростей на входе в трубу показывают, что на оси трубы скорость минимальна, далее скорость незначительно возрастает при приближении к стенкам (рисунок 4.14). На расстоянии $0.6 \div 0.7a$ происходит тангенциальный разрыв скорости, то есть происходит резкое изменение величины и направления скорости. Вблизи стенок наблюдается вихревое течение.

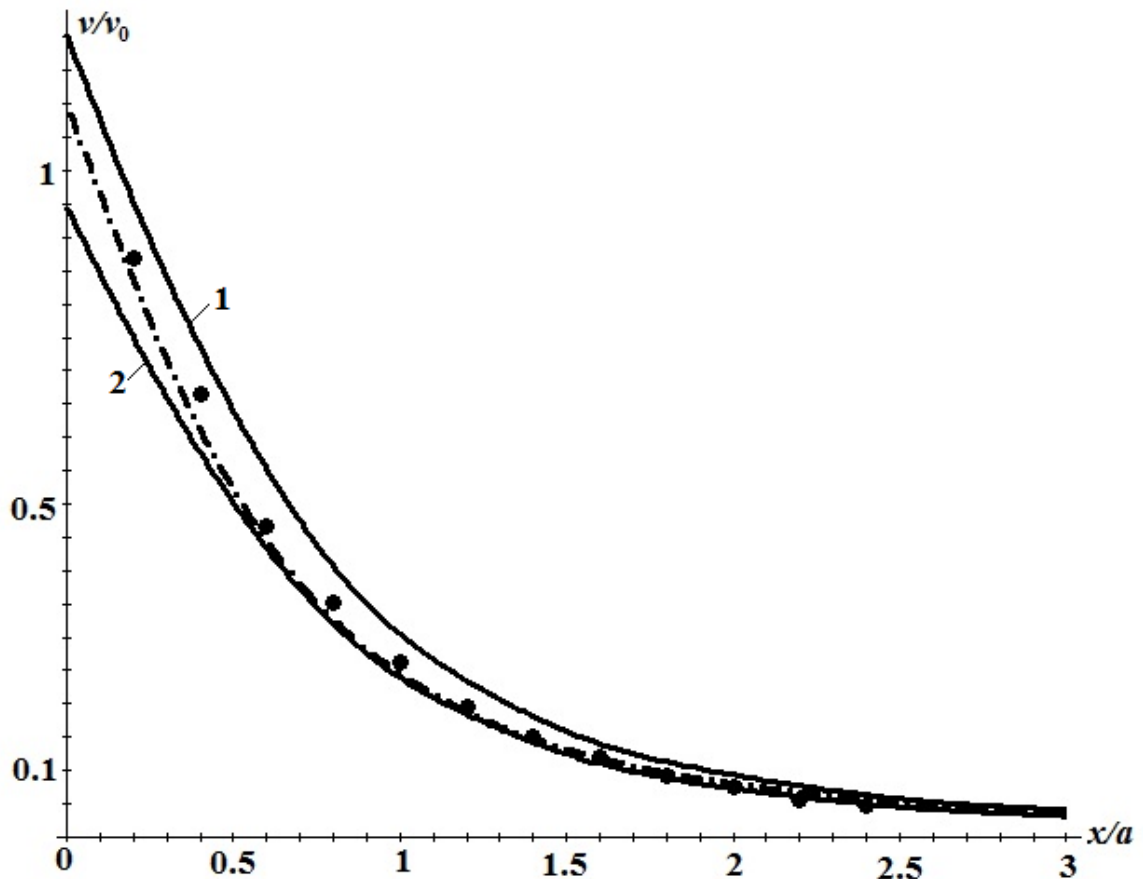


Рисунок 4.13 - Изменение осевой скорости при удалении от входа во всасывающий канал

Линии тока пульсируют с течением времени (рисунок 4.15). Величина ширины эффективного всасывания в осевом сечении, проходящем через середины противоположных сторон трубы на входе в трубу, осредненная во времени, равна $B \approx 0.82a$. При входе в трубу поток сжимается до $\approx 0.66a$. Это происходит на расстоянии $\approx 0.8a$ от входа в трубу.

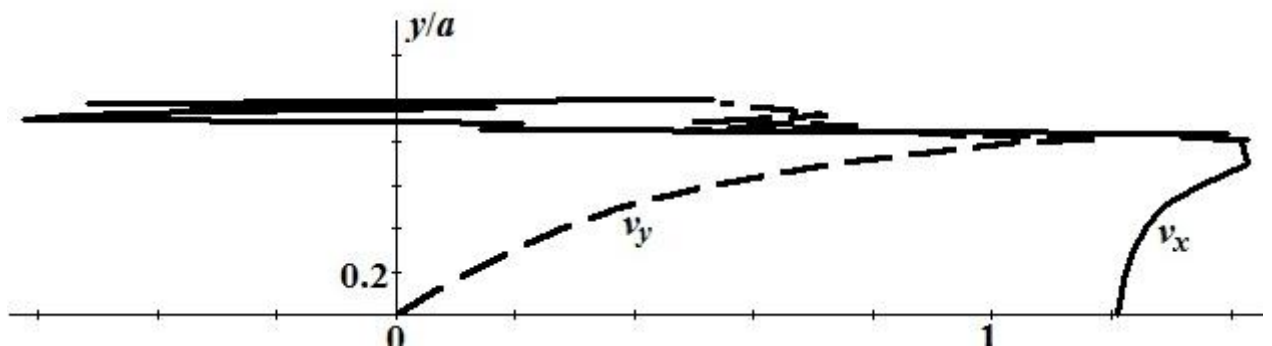


Рисунок 4.14 - Профиль скоростей на входе в квадратный всасывающий канал в плоскости проходящей через середины противоположных сторон

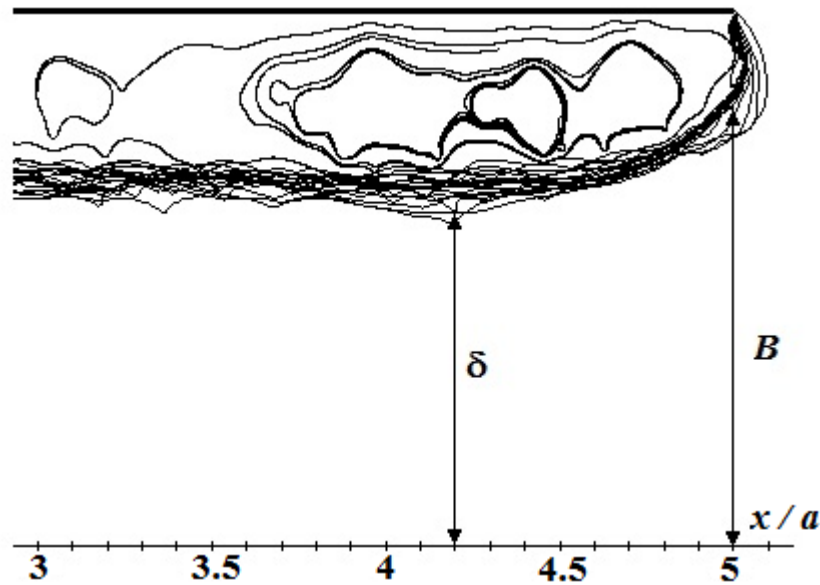


Рисунок 4.15 - Линии тока в сечении XOY (XOZ)

Для линий тока в системе координат, показанной на рисунке 4.16 предлагаются следующие формулы расчета:

$$x = 1.72(|y| - 1)^2 - 2.88(|y| - 1) + 0.82 + 0.76 \ln(|y| - 0.66), \quad (4.8)$$

Здесь показаны линии тока в плоскости, проходящей через ось отсоса и через середины противоположных сторон. Ось OX направлена по оси отсоса; оси OY, OZ - через середины противоположных сторон. Все размеры отнесены к полустороне a квадрата. Понятно, что если в формуле (4.8) поменять y на z получим линии тока в плоскости XOZ.

Отрывную поверхность тока в правой системе координат XYZ (рисунок 4.16) можно определить из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} (z \leq y \cap z \geq -y) \cup (z \geq y \cap z \leq -y) &\Rightarrow \\ x = 1.72(|z| - 1)^2 - 2.88(|z| - 1) + 0.82 + 0.76 \ln(|z| - 0.66); \\ (z \geq y \cap z \geq -y) \cup (z \leq y \cap z \leq -y) &\Rightarrow \\ x = 1.72(|y| - 1)^2 - 2.88(|y| - 1) + 0.82 + 0.76 \ln(|y| - 0.66). \end{aligned}$$

Заметим, что в этих формулах полагалось, что сжатое сечение имеет квадратную форму. Эта форма несколько нарушается при приближении к углам сечения (рисунок 4.17).

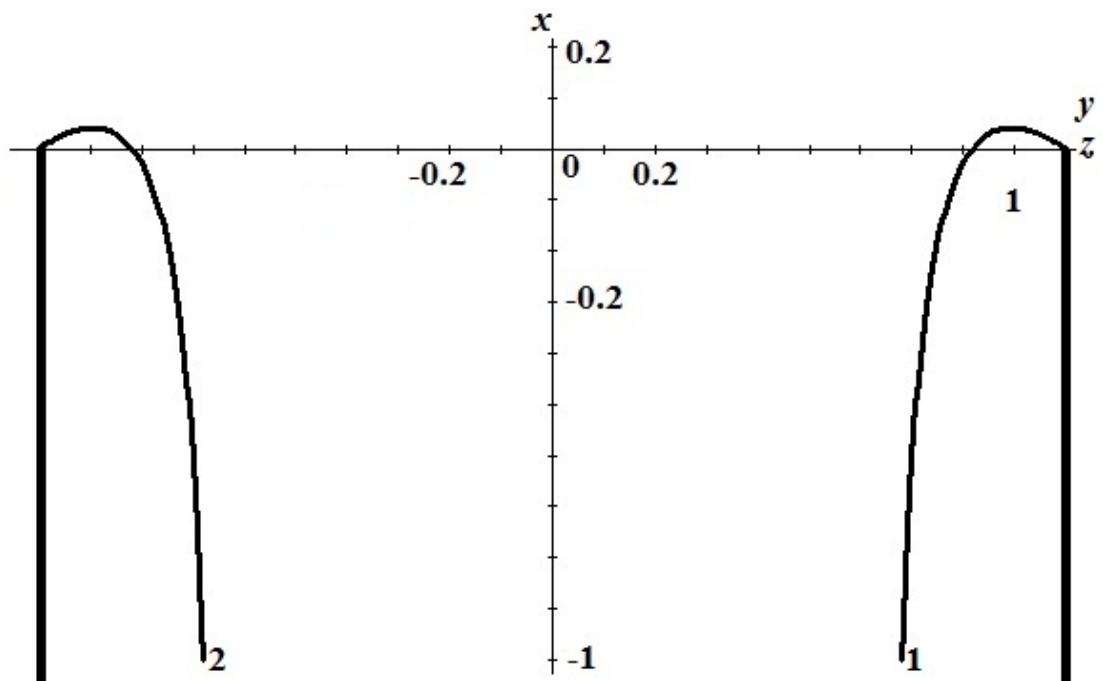


Рисунок 4.16 - Линии тока, построенные по формуле (4.8)

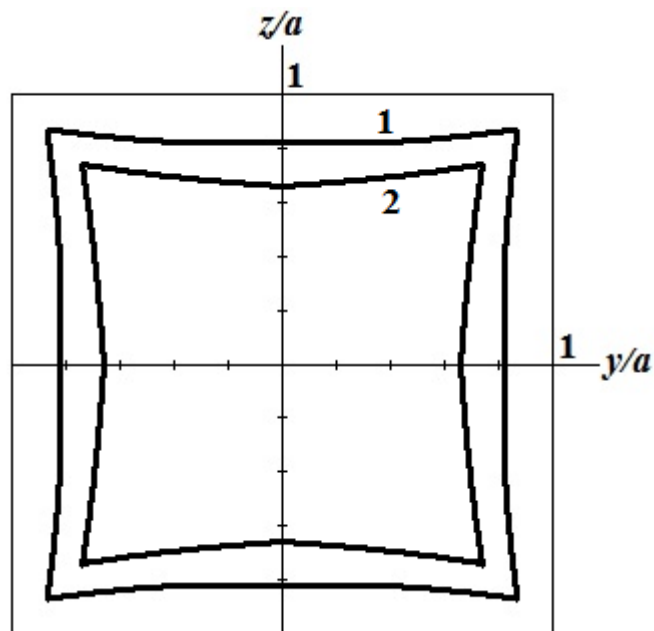


Рисунок 4.17 - Граница всасывающего сечения: кривая 1 - на входе в квадратную трубу; 2 - в сечении заглубленном на расстояние $\approx 0.8a$

Площадь всасывающего сечения равна $\approx 0.699 a^2$, что на $\approx 4\%$ больше, чем если считать его квадратным с площадью равной $\approx 0.672 a^2$. Площадь эффективного всасывания в сечении, заглубленном на расстояние $\approx 0.8a$ от входа в трубу составляет $0.50675 a^2$. Если посчитать к.м.с. по формуле Борда:

$$\zeta = \left(1 - \frac{a^2}{S}\right)^2 \approx \left(1 - \frac{1}{0.507}\right)^2 \approx 0.95.$$

Для практики принято считать этот коэффициент равным 1.

4.3 Описание разработанных компьютерных программ

На основе расчетных соотношений для расчета отрыва потока на входе в круглую трубу в квазиосесимметричной постановке, изложенных в п.4.1.4, разработана компьютерная программа. При загрузке программы появляется главное окно, изображенное на рисунке 4.18.

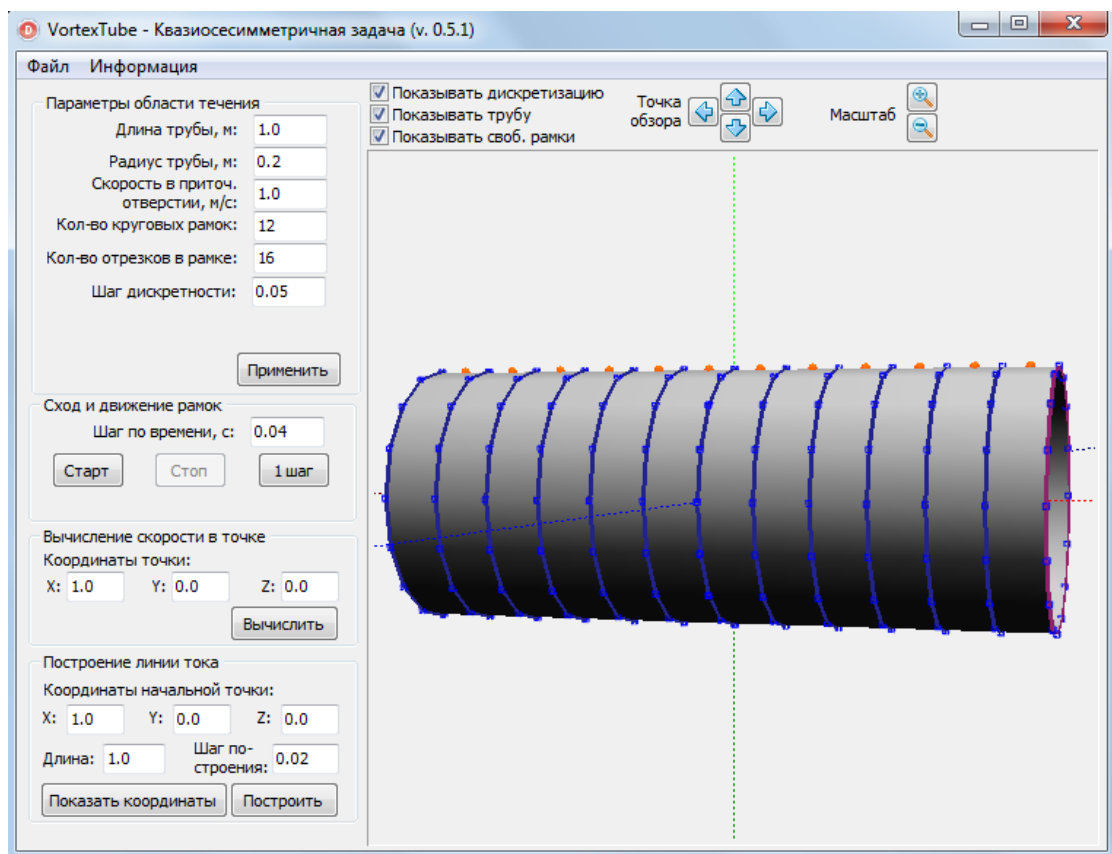
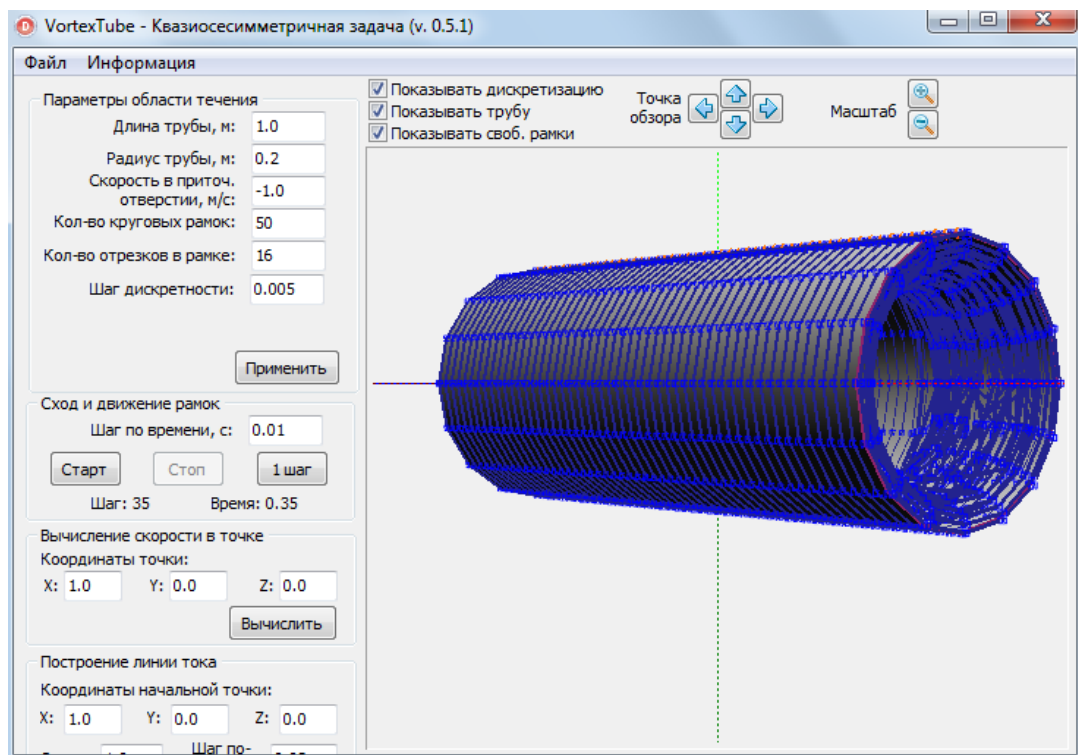


Рисунок 4.18 - Главное окно программы для расчета отрыва потока на входе в круглую трубу в квазиосесимметричной постановке

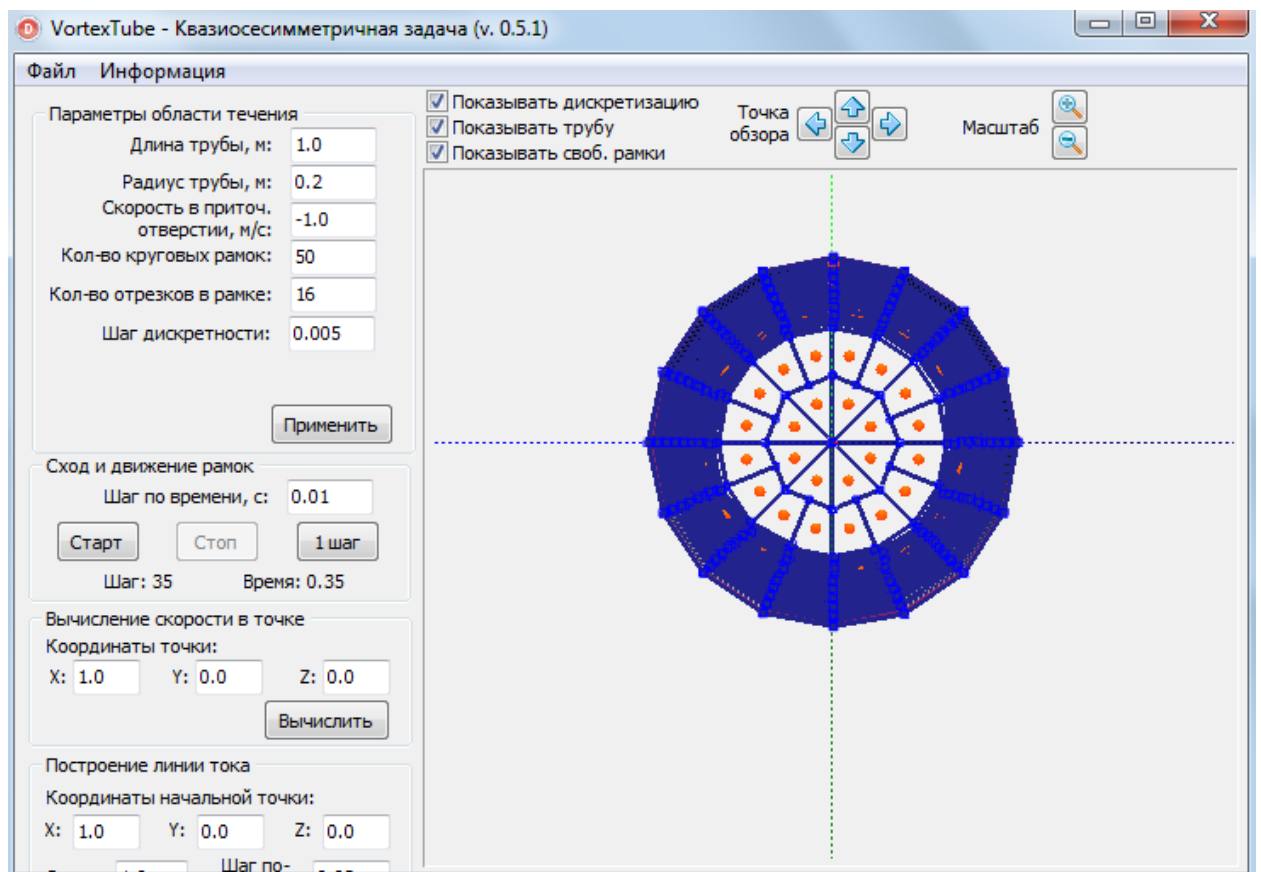
В левой части окна предусмотрена возможность ввода параметров области течения: длины трубы, м; радиуса трубы, м; скорости в активном сечении, м/с; количество многоугольных рамок, моделирующих трубу; количество отрезков в каждой многоугольной рамке; шаг дискретности, м. При задании положительного

значения скорости будем иметь приточное отверстие и можно исследовать турбулентное течение при истечении воздуха из многоугольной трубы. В случае ввода отрицательного значения скорости в активном сечении представляется возможность отрыва потока на входе в многоугольную трубу. После ввода параметров области течения необходимо нажать кнопку "Применить". После чего, в случае необходимости, следует ввести шаг по времени. При нажатии кнопки "Старт" визуализируется развитие вихревой структуры во времени, то есть происходит сход свободных многоугольных рамок. Кнопка "Стоп" останавливает этот процесс. Существует возможность пошагового моделирования. Для этого существует кнопка "1 шаг". Полученную вихревую структуру течения можно просматривать, вращая рисунок (рисунок 4.19 а-г) с помощью мышки и с помощью стрелок, озаглавленных "Точка обзора" в верхней части главного окна программы. При этом выделенные оранжевым цветом точки являются расчётными, в которых задаются граничные условия для нормали скорости.

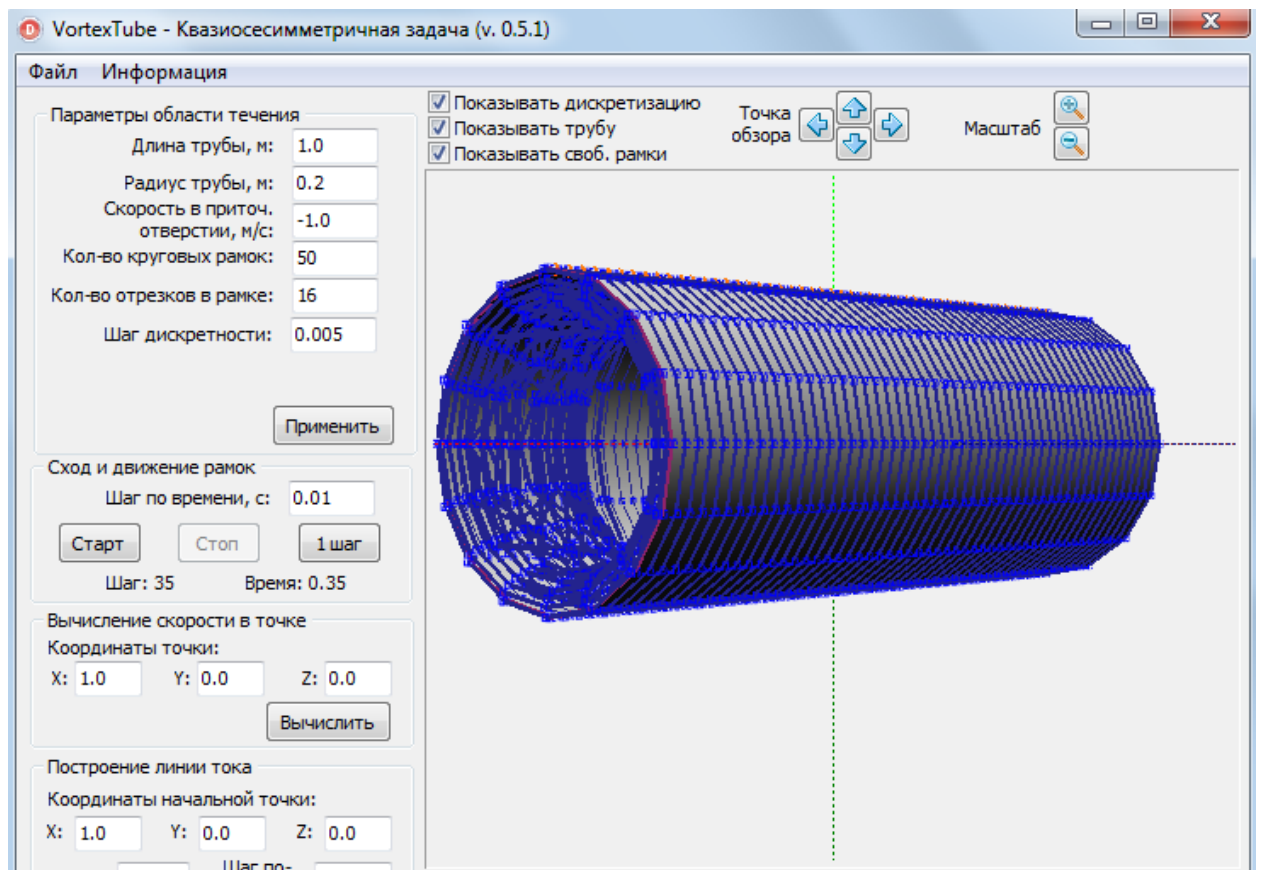


а) труба направленная вправо

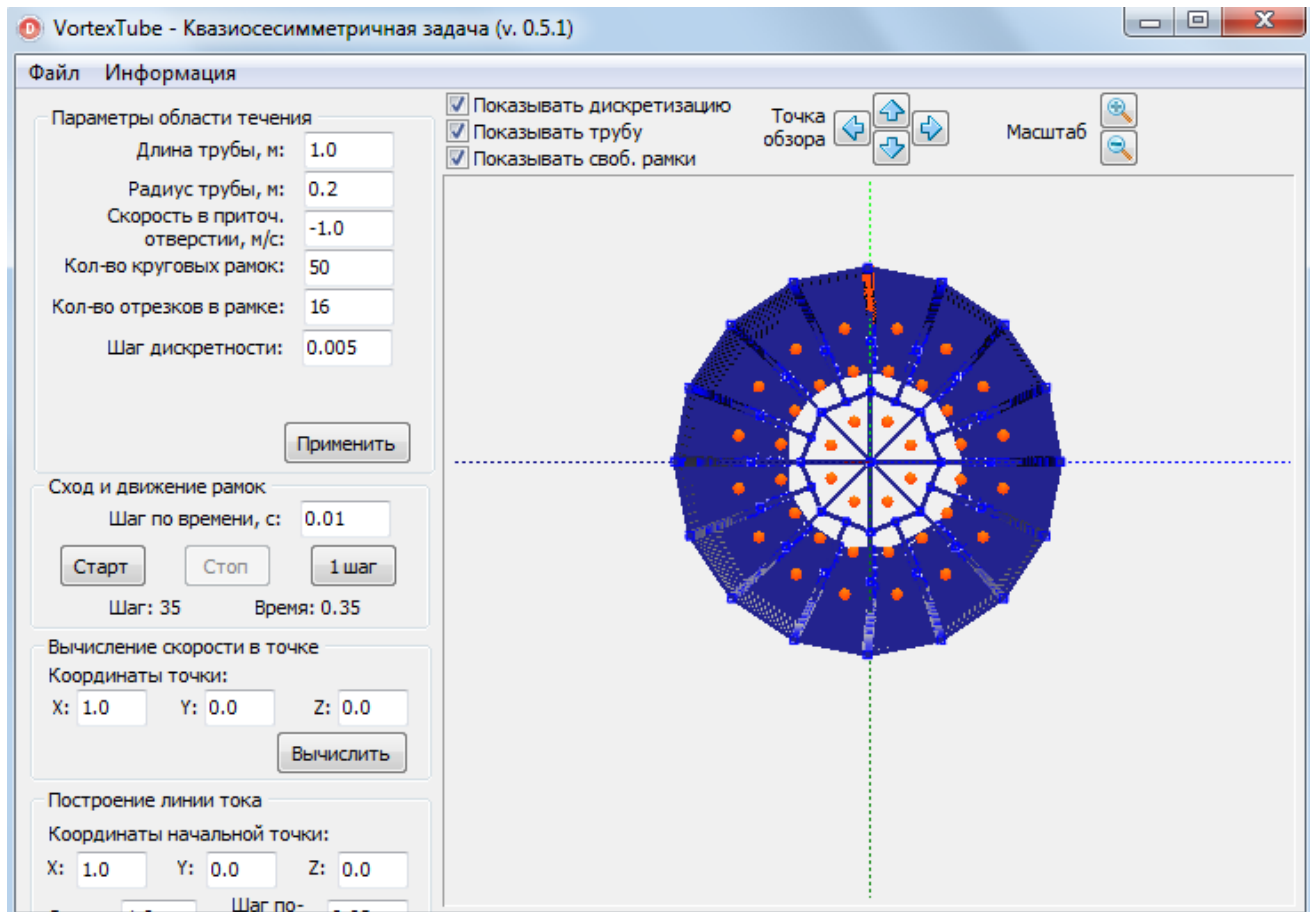
Рисунок 4.19 - Возможности поворота визуализации развития вихревой структуры во времени
(Начало)



б) передняя часть трубы



в) труба направленная влево

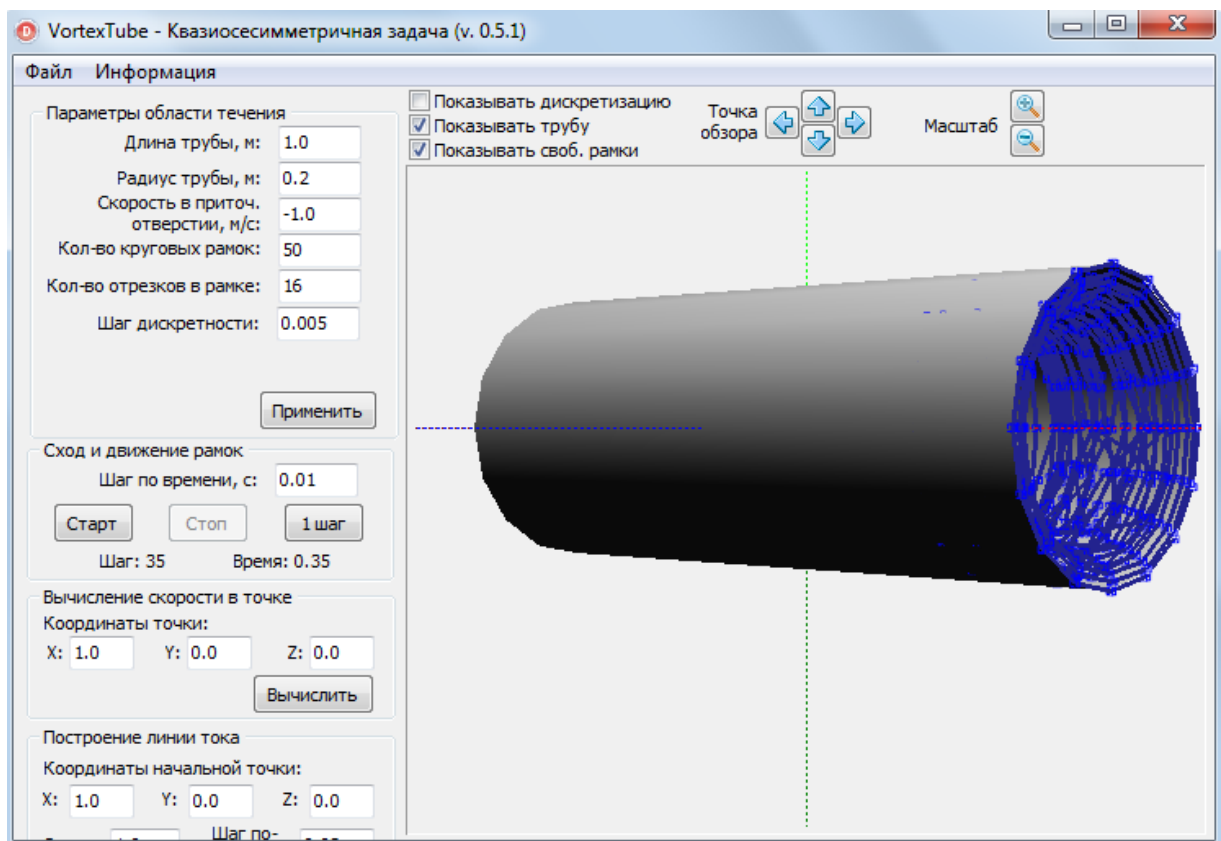


г) задняя часть трубы

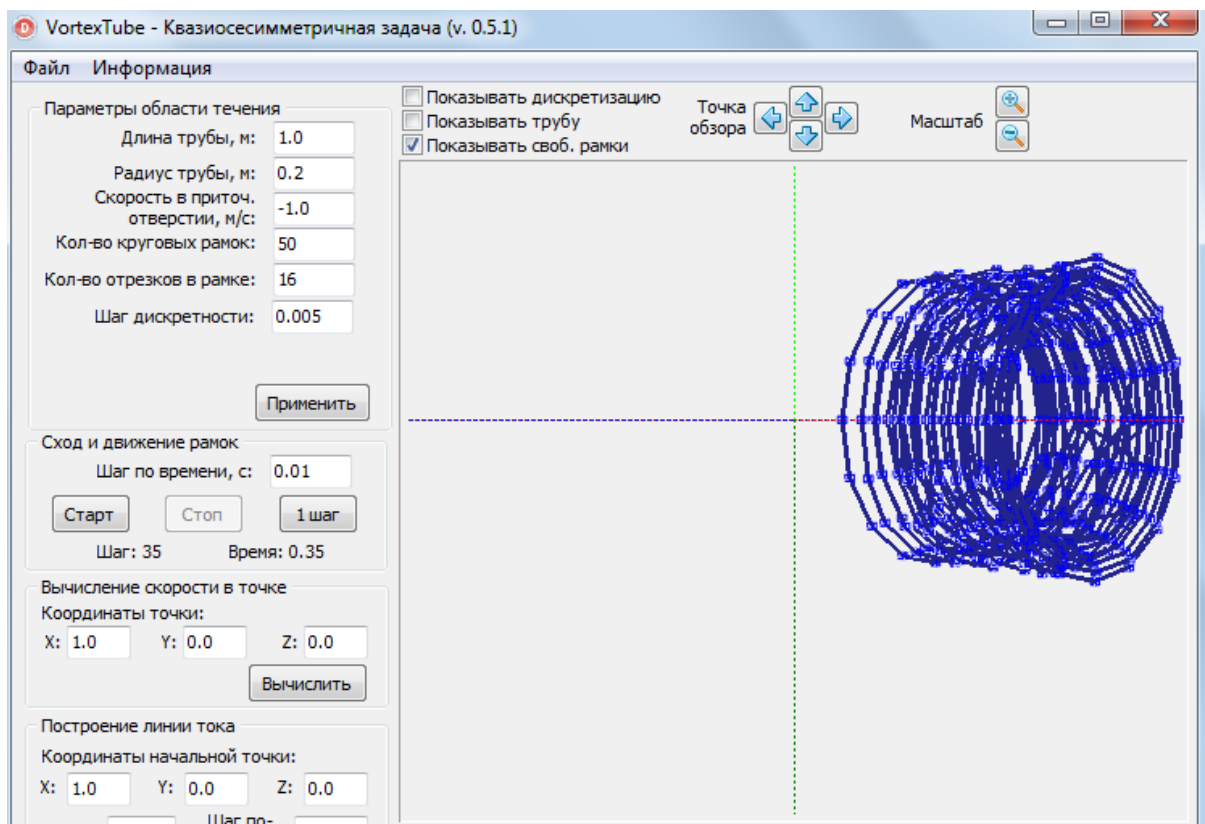
Рисунок 4.19 - Окончание

Есть возможность увеличивать или уменьшать масштаб изображения с помощью кнопок "+" и "-", расположенных в правой части главного окна программы.

Предусмотрена возможность управлять режимом визуализации с помощью галочек, устанавливаемых в окнах "Показать дискретизацию", "Показать трубу", "Показать свободные рамки". Когда установлены все три режима, то имеем картины, изображенные на рисунке 4.19. Если снять галочку с режима "Показать дискретизацию", то присоединенные многоугольные вихревые рамки изображаться не будут (рисунок 4.20 а). Если снять вторую галочку с режима "Показывать трубу", то будут показываться только свободные вихревые многоугольные рамки (рисунок 4.20 б).



а)



б)

Рисунок 4.20 - Режимы визуализации

В любой момент времени в произвольной точке вычислить составляющие скорости возможно путем ввода координат точки в предусмотренные окошки в левой части главного окна программы и нажатием кнопки "Вычислить" (рисунок 4.21).

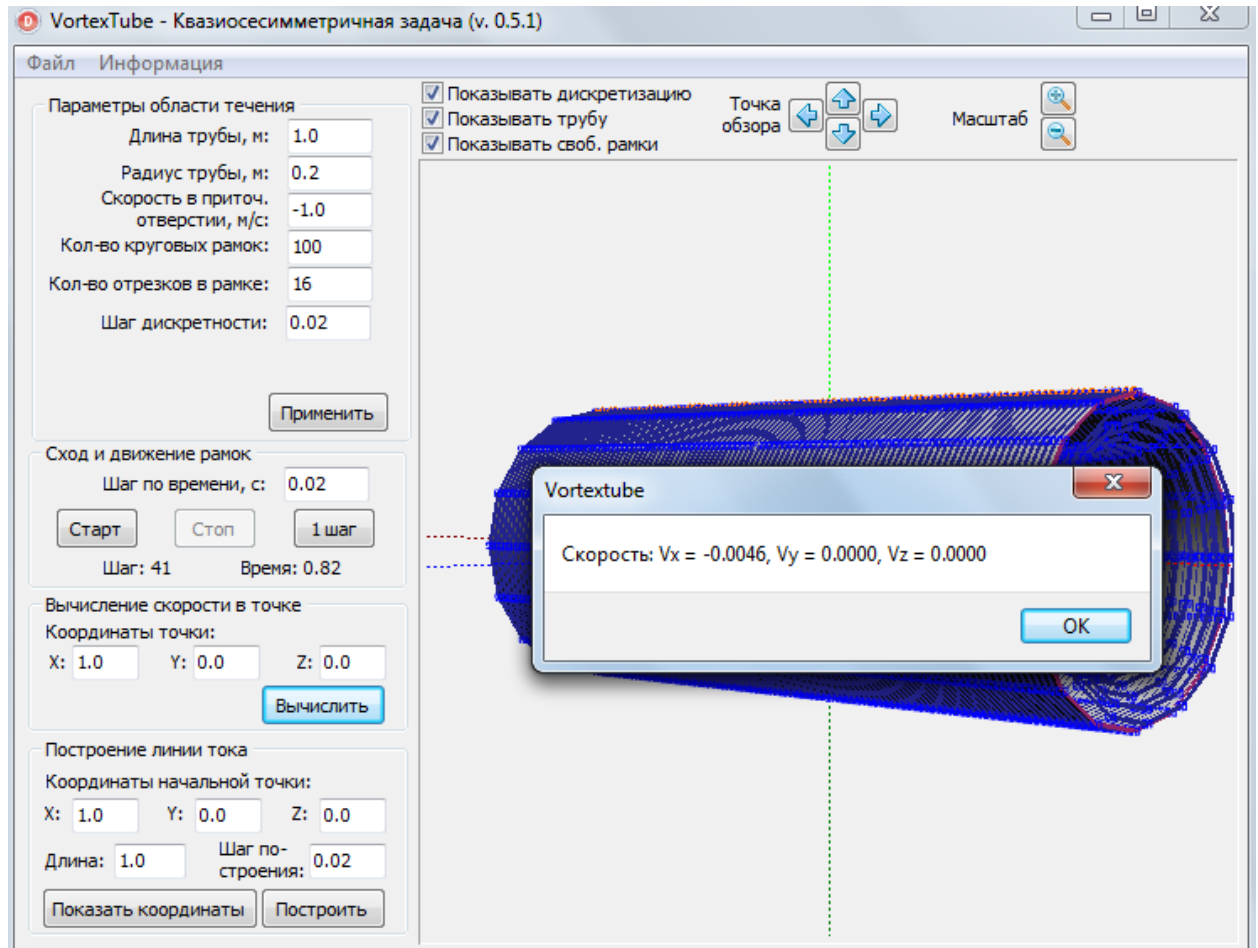


Рисунок 4.21 - Вычисление составляющих скорости

Для построения линий тока предусмотрены окошки и кнопки в левой нижней части главного окна программы. Вначале необходимо ввести координаты начальной точки для построения линии тока в специально предусмотренные окошки озаглавленные "X", "Y", "Z". Также вводятся максимальная длина линии тока и шаг построения в окошки "Длина" и "Шаг построения". После нажатия кнопки "Построить" имеем результат в виде линии тока (рисунок 4.22).

Линия тока строится либо до достижения максимальной длины, либо по достижению всасывающего сечения. При нажатии кнопки "Показать координаты"

в отдельном окне представляются координаты построенной линии тока (рисунок 4.23).

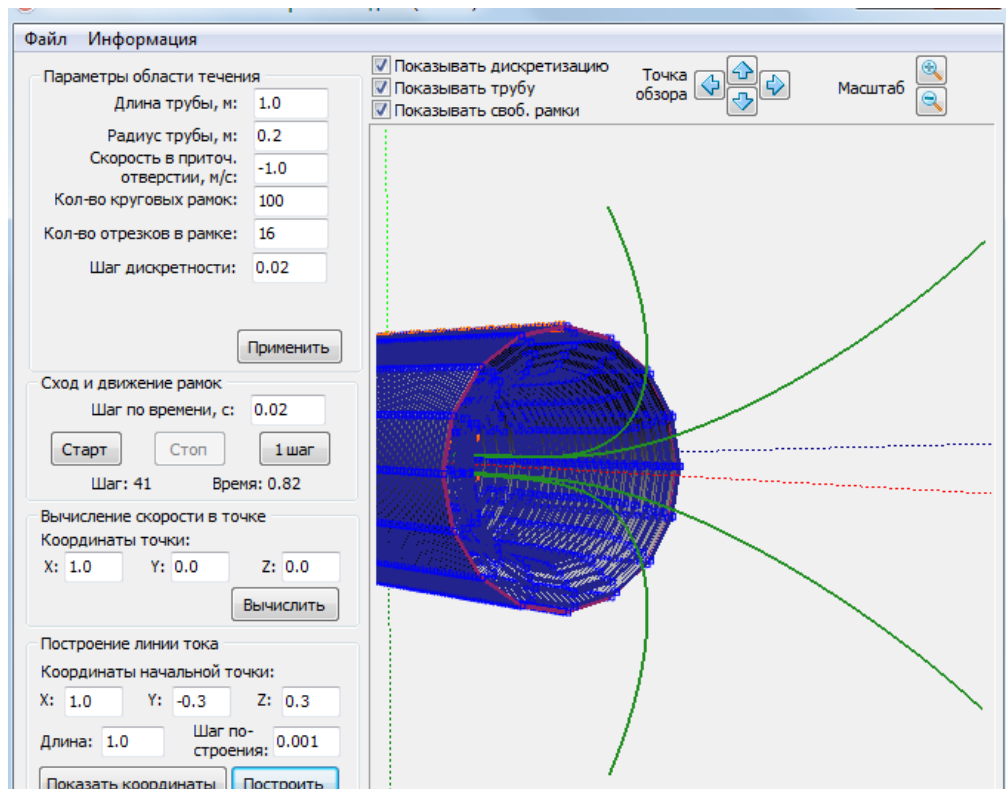


Рисунок 4.22 - Построение линий тока

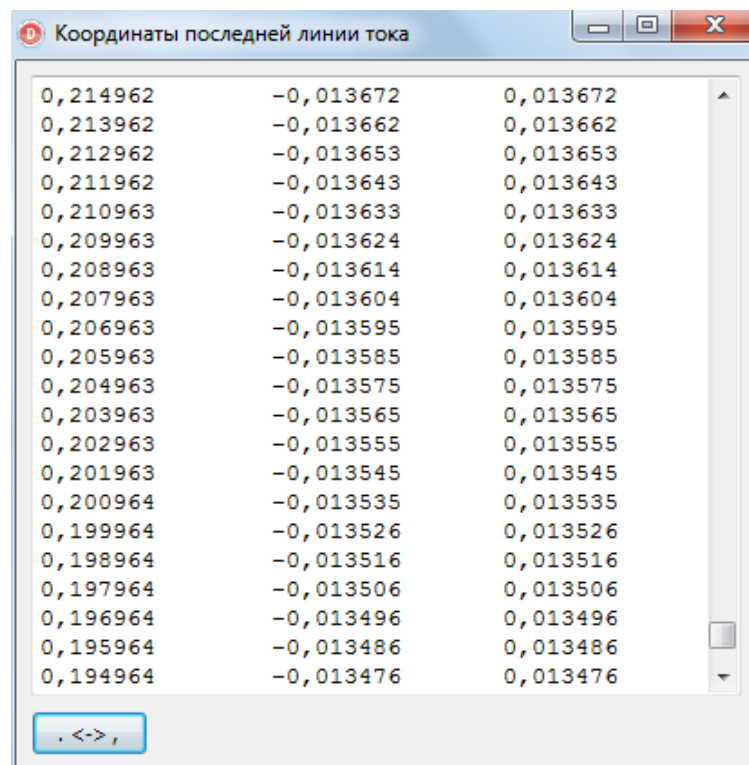
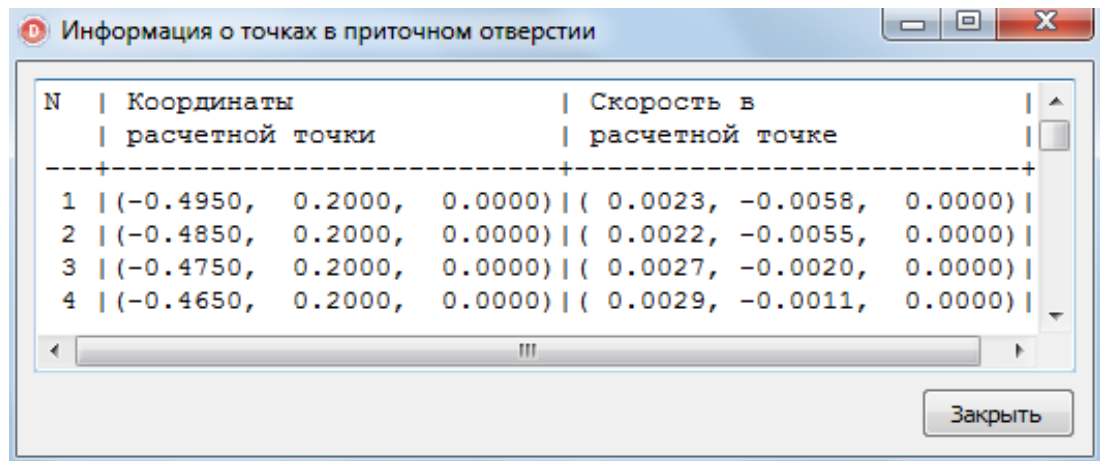


Рисунок 4.23 - Координаты линии тока

При использовании пункта меню "Информация" выпадают подпункты "Точки и рамки в приточном сечении", "Плоская проекция течения", "Подобрать шаг дискретности". Пункт "Точки и рамки в приточном сечении" служит для проверки правильности моделирования, и при его выборе выводится информация о координатах расчетных точек, составляющих скорости в этих точках (рисунок 4.24), а также интенсивность присоединенных вихревых рамок.



N	Координаты расчетной точки	Скорость в расчетной точке
1	(-0.4950, 0.2000, 0.0000)	(0.0023, -0.0058, 0.0000)
2	(-0.4850, 0.2000, 0.0000)	(0.0022, -0.0055, 0.0000)
3	(-0.4750, 0.2000, 0.0000)	(0.0027, -0.0020, 0.0000)
4	(-0.4650, 0.2000, 0.0000)	(0.0029, -0.0011, 0.0000)

Рисунок 4.24 - Информация о координатах расчетных точек и скорости

При использовании кнопки "Плоская проекция течения" высвечивается картина в плоскости, проходящей через ось симметрии (рисунок 4.25).

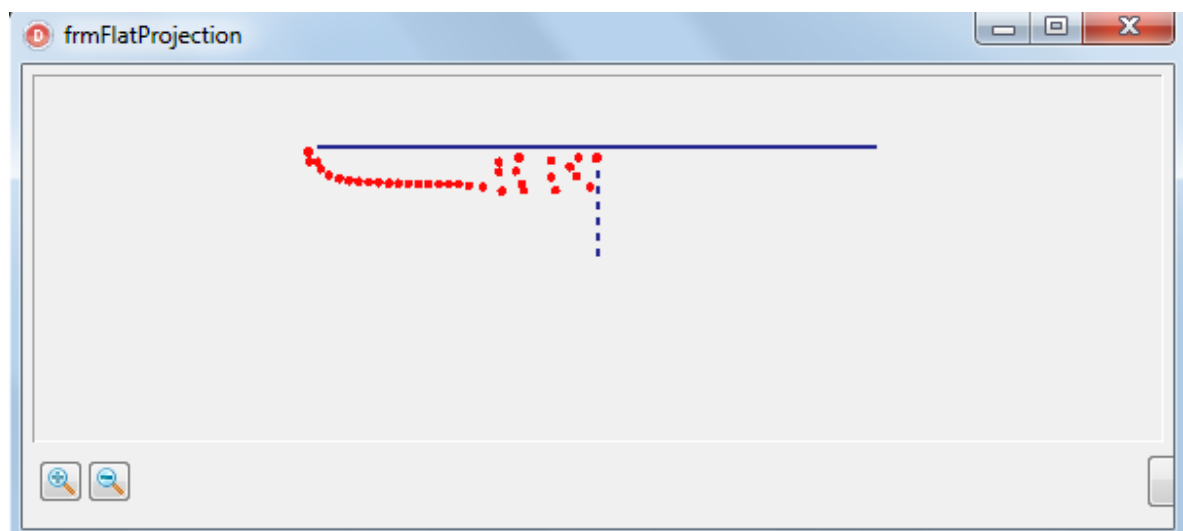


Рисунок 4.25 - Плоская проекция течения

Выбор шага дискретности осуществляется при помощи кнопки "Подобрать шаг дискретности" (рисунок 4.26). Пункт меню "Файл", "Выход" служит для завершения работы компьютерной программы.

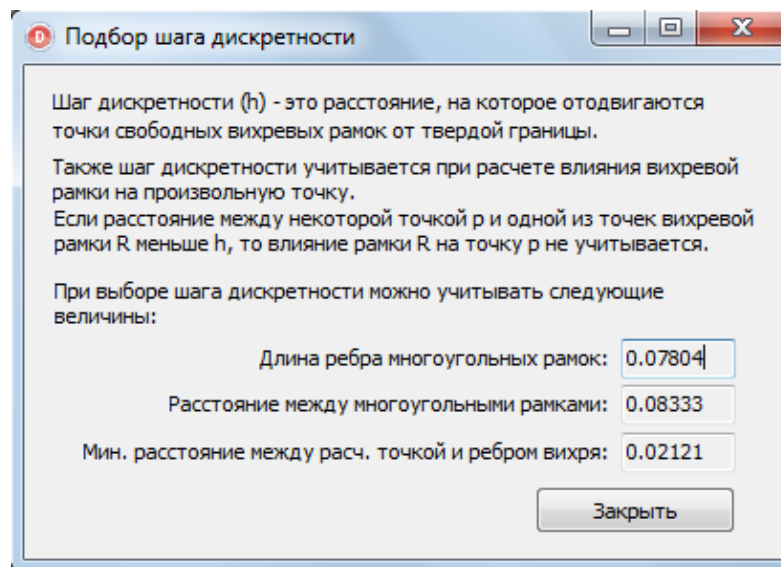


Рисунок 4.26 - Окно для выбора шага дискретности

Для моделирования отрыва потока на входе в квадратное всасывающее отверстие разработана компьютерная программа, главное окно которой изображено на рисунке 4.27. Отличие этой программы от предыдущей состоит в способе дискретизации и задании параметров области течения. Здесь использовались квадратные вихревые рамки, как в активном сечении, так и на боковой поверхности трубы.

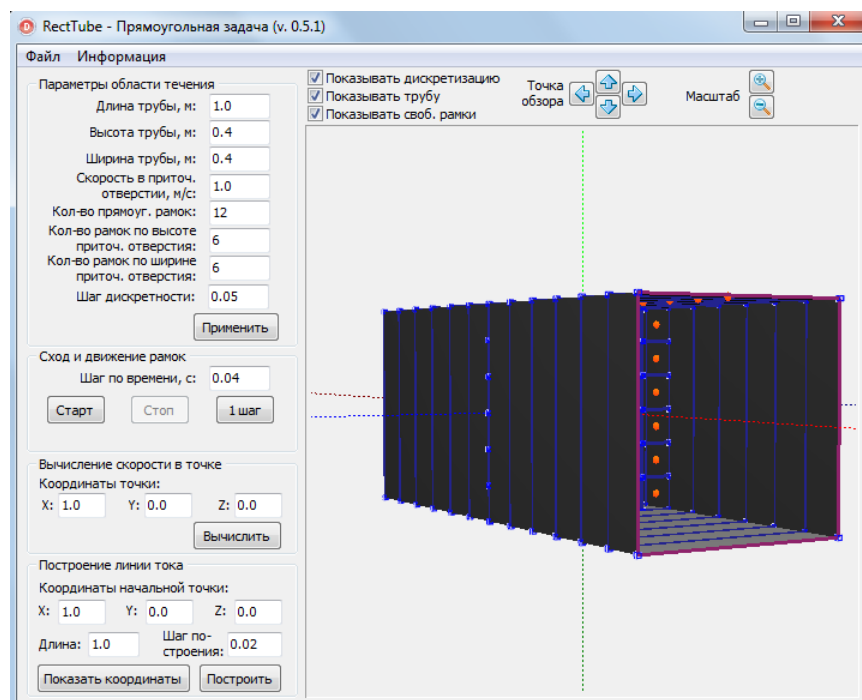


Рисунок 4.27 - Главное окно программы для расчета отрыва потока на входе в квадратное всасывающее отверстие

Все остальные пункты меню и возможности компьютерной программы аналогичны программе расчета отрыва потока на входе в круглый всасывающий или приточный патрубок.

Выводы по четвертой главе

1. Разработаны методы математического моделирования и их программно-алгоритмическая поддержка для расчета осесимметричных и пространственных отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов. Использование стационарных дискретных вихрей позволяет с достаточной точностью определять поле скоростей, границы отрыва потока и к.м.с. на вход во всасывающее отверстие. Моделирование нестационарных течений при помощи кольцевых вихревых особенностей позволяет исследовать вихревые течения в застойных областях и определять пульсации скорости. Использование вихревых многоугольников дает дополнительную возможность исследования пространственных течений в областях с приточными и вытяжными каналами, выявлять зависимости взаимодействия приточных и вытяжных струйных течений.

2. В рамках идеологии метода дискретных вихрей в нестационарной квазиосесимметричной постановке построена математическая модель отрывного течения на входе в квадратный всасывающий патрубок и ее программно-алгоритмическая реализация. Определены поле скоростей на входе во всасывающий канал и линия отрыва потока. Разработаны аналитические формулы для определения поверхности отрыва. Полученные результаты могут быть полезны для проектирования систем местной вытяжной вентиляции сниженной энергоемкости.

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная задача по выявлению закономерностей отрыва потока на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов, способствующих снижению расхода воздуха, необходимого для эффективного улавливания загрязняющих веществ.

Основные выводы по работе

1. Разработана и протестирована на адекватность математическая модель срыва потока идеальной несжимаемой жидкости с острых кромок канала. Использование разработанной итерационной процедуры определения свободной линии тока и дискретной модели с использованием стационарных дискретных вихрей позволяет расширить круг решаемых задач, определять аэродинамическое поле и параметры отрыва потока в областях со сложными границами и иной размерности, где методы функций комплексного переменного не применимы.

2. На основании стационарных дискретных вихревых колец разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа расчета отрыва потока на входе во всасывающий круглый канал, снабженный механическим кольцевым экраном с выступом. Вычислительный и натурный эксперимент позволили установить размеры и расположение экранов, способствующих наибольшему сопротивлению входа во всасывающий канал за счет эффекта отрыва струи. Для круглых всасывающих отверстий, выступающих из плоской стенки на расстояние полурадиуса, предлагается устанавливать на расстоянии 0.1-0.2 радиуса диск с центральным отверстием такого же диаметра, что и всасывающий канал, и шириной кольца равной 0.7-1 радиуса, что позволяет увеличить к.м.с. на 20% относительно случая отсутствия этого экрана. Получена аналитическая зависимость связи к.м.с. и коэффициента сжатия струи.

3. На разработанном полупромышленном образце укрытия с неплотностью прямоугольной формы проведены экспериментальные исследования влияния горизонтальных, вертикальных, наклонных и двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в неплотность. Показано, что оборудование

щелевой неплотности горизонтальным козырьком длиной 0,5-0,7 калибра (калибр - высота неплотности) и уголком высотой в 1 калибр и шириной 0,5 калибра на расстоянии до козырька в диапазоне 0,5-1 калибра позволяет снизить расход воздуха более 17%.

4. Разработаны методы математического моделирования и их программно-алгоритмическая поддержка для расчета осесимметричных и пространственных отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов. Использование стационарных дискретных вихрей позволяет с достаточной точностью определять поле скоростей, границы отрыва потока и к.м.с. на входе во всасывающее отверстие. Моделирование нестационарных течений при помощи кольцевых вихревых особенностей позволяет исследовать вихревые течения в застойных областях и определять пульсации скорости. Использование вихревых многоугольников дает дополнительную возможность исследования пространственных течений в областях с приточными и вытяжными каналами, выявлять зависимости взаимодействия приточных и вытяжных струйных течений.

5. В рамках идеологии метода дискретных вихрей в нестационарной квазиосесимметричной постановке построена математическая модель отрывного течения на входе в квадратный всасывающий патрубок и ее программно-алгоритмическая реализация. Определены: поле скоростей на входе во всасывающий канал и линия отрыва потока. Получена аналитическая зависимость для определения поверхности отрыва. Полученные результаты могут быть полезны для проектирования систем местной вытяжной вентиляции сниженной энергоемкости.

Список литературы

1. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
3. Гогиш, Л. В. Турбулентные отрывные течения / Л. В. Гогиш, Г. Ю. Степанов. – М.: Наука, 1979. – 367 с.
4. Чжен, П. Управление отрывом потока. Экономичность, эффективность, безопасность / П. Чжен. – М.: Мир, 1979. – 552 с.
5. Чжен, П. Отрывные течения / П. Чжен. – М.: Мир, 1972. – Т.1. – 300 с.; 1973. – Т.2. – 280 с.; 1973. – Т. 3. – 334 с.
6. Paraschivoiu, I. Wind Turbine Design / I. Paraschivoiu // With Emphasis on Darrieus Concept – Montreal: Polytechnic International Press, 2002. – 438 p.
7. Гуревич, М. И. Теория струй идеальной жидкости / М. И. Гуревич. – М.: Наука, 1979. – 536 с.
8. Аэродинамика отрывных течений / Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой, В. Т. Калугин; под ред. Н. Ф. Краснова. — М.: Высшая школа, 1988. — 351 с.
9. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.
10. Белоцерковский, С. М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью / С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
11. Гиневский, А. С. Вихревые следы самолетов / А. С. Гиневский, А. И. Желанников. – М.: Физматлит, 2008. – 172 с.
12. Посохин, В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В. Н. Посохин. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
13. Посохин, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Посохин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.

14. Посохин, В. Н. Местная вентиляция / В. Н. Посохин. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2005. – 72 с.

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

16. Посохин, В. Н. Экспериментальное изучение вихревых зон в потоках вблизи всасывающих щелевых отверстий / В. Н. Посохин, М. В. Катков // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2001. – № 1. – С.61–63.

17. Логачев, К. И. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, В. Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 7–8. – С.61–69.

18. Логачев, К. И. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка / К. И. Логачев, В. Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2004. – № 1. – С. 29–32.

19. 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.

20. Логачев, К. И. Расчет вихревого течения у щелевидного бокового отсоса / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, В. Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 6. – С. 64–69.

21. Посохин, В. Н. Расчет скоростей подтекания к щелевому стоку-раструбу / В. Н. Посохин, Р. Г. Сафиуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14, № 22. – С. 41–46.

22. Посохин, В. Н. К расчету течения вблизи раструба / В. Н. Посохин, Р. Г. Сафиуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 8. – С. 60–62.

23. Посохин, В. Н. Геометрические характеристики отрывных зон на входе в плоские и осесимметричные стоки-раструбы / В. Н. Посохин, Р. Г. Сафиуллин,

А. Р. Фаттахов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 16. – С. 62–64.

24. Маклаков, Д. В. К расчету бортовых отсосов. Сообщение 1 / Д. В. Маклаков, В. Н. Посохин, А. Р. Фаттахов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2010. – № 3. – С. 73–79.

25. Маклаков, Д. В. К расчету бортовых отсосов. Сообщение 2. О необходимой интенсивности двухуровневого бортового отсоса / Д. В. Маклаков, В. Н. Посохин, А. Р. Фаттахов // Известия высших учебных заведений. – Строительство. – 2010. – № 5. – С. 40–45.

26. Посохин, В. Н. О размерах отрывных зон на входе в отсос / В. Н. Посохин, А. Р. Фаттахов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2006. – № 8. – С. 52–54.

27. Маклаков, Д. В. О форме свободной линии тока на входе в щелевидный сток / Д. В. Маклаков, В. Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 2. – С. 74–78.

28. Посохин, В. Н. О форме отрывных зон на входе в раструб / В. Н. Посохин, Н. Б. Салимов, Р. Г. Сафиуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. – № 3–4. – С. 39–47.

29. Посохин, В. Н. К расчету течения вблизи всасывающей щели с раструбом / В. Н. Посохин, И. Л. Гуревич // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 1981. – № 3. – С. 84.

30. Design Guidebook. Industrial Ventilation. – USA, 2001.

31. Логачев, И. Н. Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 68–77.

32. Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, В. Ю. Зоря, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 43–52.

33. Аверкова, О. Аэродинамика противопылевой вентиляции / О. Аверкова, И. Логачев, К. Логачев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, 2012. – 424 с. – ISBN 978–3–8484–2346–0

34. Аверкова, О. Моделирование процессов обеспыливания технологического оборудования / О. Аверкова. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, 2012. – 372 с. – ISBN 978–3–659–16388–3

35. Аверкова, О. А. Отрывные течения в спектрах вытяжных каналов / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Москва–Ижевск: ИКИ, 2012. – 288 с.

36. Аверкова, О. А. Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т.13, № 2. – С. 298–306.

37. Аверкова, О. А. Экспериментальное исследование отрывных течений на входе во всасывающие отверстия / О. А. Аверкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 158–160.

38. Аверкова, О. А. Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы с использованием метода дискретных вихрей в нестационарной постановке / О. А. Аверкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 133–135.

39. Аверкова, О. А. Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы с использованием теории функций комплексного переменного / О. А. Аверкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 3. — С. 158–160.

40. Моделирование вихревых нестационарных течений в разомкнутых областях / О. А. Аверкова, Д. И. Иваненков, К. И. Логачев, Е. И. Толмачева // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 13–19.

41. Аверкова, О. А. Моделирование вязких отрывных течений во всасывающие каналы / О. А. Аверкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С.166–168.

42. Аверкова, О. А. Моделирование отрыва потока на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Новые огнеупоры. – 2012. – № 10. – С.56–60.

43. O. Averkova, A. Modeling of gas separated flows at inlet of suction channels on the basis of stationary discrete vortices / O. Averkova, A. Logachev, I. Logachev, K. Logachev // CD-ROM Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), September 10-14, 2012, Vienna, Austria; eds.: Eberhardsteiner, J., Böhm, H.J., Rammerstorfer, F.G. – Publisher: Vienna University of Technology, Austria. – P.1–20. – ISBN 978-3-9502481-9-7.

44. Аверкова, О. А. Вычислительный эксперимент в аэродинамике вентиляции: учебное пособие / О. А. Аверкова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 110 с.

45. Аверкова, О. А. Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т.12, № 2. – С. 213–219.

46. Аверкова, О. А. Разработка метода математического моделирования отрывных течений на основе стационарных дискретных вихрей / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Информатика. – 2011. – № 1(96), вып. 17/1. – С. 130–136.

47. Аверкова, О. А. Численное моделирование отрывных течений на входе в плоские всасывающие каналы на основе метода дискретных вихрей в стационарной постановке / О. А. Аверкова, К. И. Логачев // Труды XV Международного симпозиума "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики". – Харьков–Херсон, 2011. – С. 21–24.

48. Обеспыливающая вентиляция: монография / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др.; под общ. ред. В. А. Минко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 565 с.

49. Логачев, И. Н. Математическое моделирование струйного течения воздуха при входе в плоский канал с козырьком и непроницаемым экраном / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 160–167.

50. Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев, И. Н. Логачев // Новые огнеупоры. – 2010. – № 5. – С.31–36.

51. Аверкова, О. А. Компьютерное моделирование вихревых течений в аспирационном укрытии с щелевыми неплотностями / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2010. – № 1, вып. 13/1. – С.93–100.

52. Аверкова, О. А. Вычислительный алгоритм расчета отрывных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, А. А. Аверков // В мире научных открытий. – 2010. – № 2(08), ч. 4. – С.111–113.

53. Аверкова, О. А. К вопросу о снижении энергоемкости систем аспирации / О. А. Аверкова, А. А. Аверков // В мире научных открытий. – 2010. – № 2(08), ч. 4. – С.113–116.

54. Математическое моделирование вихревых течений в щелевых неплотностях аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, И. Н. Логачев и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С.58–69.

55. Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters / O. A. Averkova, V. Yu. Zorya, I. N. Logachev, K. I. Logachev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2010. – Vol. 51. – N 3. – P. 177–182.

56. Математическое моделирование отрывного течения на входе в щелевидное всасывающее отверстие с козырьком / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, В. Ю. Зоря, О. А. Аверкова // Сб. трудов XXIII Международной науч. конф.

«Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23» – Т.3, сек. 3. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – С.62–67.

57. К вопросу о моделировании пылегазовых потоков в аспирационном укрытии / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев. И. Н. Логачев // Вычислительные методы и программирование. – 2009. – Т.10, № 2. – С. 371–376.

58. Применение метода сингулярных интегральных уравнений к задачам аэродинамики вентиляции / О. А. Аверкова, А. Н. Закутский, В. Ю. Зоря и др. // Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика. – 2008.

59. Anzheurov, N. M. Software for computing dusty air flows in ventilation systems / N. M. Anzheurov, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. – 2008. – Vol. 49. N 3. – P. 229–234.

60. Аверкова, О. А. Математическое моделирование процессов в системах аспирации: учебное пособие / О. А. Аверкова, К. И. Логачев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. – 271 с.

61. Компьютерное моделирование циркуляционных течений в замкнутом помещении на основе метода дискретных вихрей / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев, Р. Ю. Овсянников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. – № 3. – С.95–102.

62. Olga A., Averkova. Discrete vortexes method in computational modeling of vortexes flows / Olga A. Averkova, Violetta U. Zorya, Konstantin I. Logachev // Ecology. Scientific articles; Bulgaria. Science Invest Ltd-branch Burgas. – 2007. – Vol. 1. – P. 144–157. – ISBN 978–954–9368–25–3.

63. Olga A., Averkova. Computational modeling of dust particles dynamics in aspiration buncers / Olga A. Averkova, Violetta U. Zorya, Konstantin I. Logachev. // Ecology; Scientific articles; Bulgaria. Science Invest Ltd-branch Burgas. – 2007. – Vol. 1. – P. 158–184. – ISBN 978–954–9368–25–3.

64. Averkova, O. A. Behavior of aerosol particles in suction bunker of standard design / O.A. Averkova, V. Yu. Zorya, K.I. Logachev. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2007. – Vol. 43. – N. 11 – P. 686–690.

65. Olga A. Averkovav. Discrete vortexes method in computational modeling of vortexes flows / Olga A. Averkova, Violetta U. Zorya, Konstantin I. Logachev // Ecology. Scientific articles; Bulgaria. Science Invest Ltd-branch Burgas. – 2007. – Vol. 1. – P. 144–157. – ISBN 978–954–9368–25–3.

66. Olga A., Averkova. Computational modeling of dust particles dynamics in aspiration buncers / Olga A. Averkova, Violetta U. Zorya, Konstantin I. Logachev // Ecology. Scientific article–s; Bulgaria. Science Invest Ltd-branch Burgas. – 2007. – Vol. 1. – P. 158–184. – ISBN 978–954–9368–25–3.

67. Логачев, И. Н. Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. – 2013. – № 6. – С.66–70.

68. Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами / О. А. Аверкова, А. К. Логачев, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Ученые записки ЦАГИ. – 2013. – Т.44, № 2. – С. 33–49.

69. Моделирование отрывного течения на входе в квадратный всасывающий канал / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 6. – С. 97–104.

70. Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев, И. В. Ходаков // Новые огнеупоры. – 2013. – № 10. – С. 57–61.

71. Моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев и др. // Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Т.14. – С. 246–253.

72. Логачев, И. Н. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова. – М.–Ижевск: РХД, 2013. – 504 с.

73. Моделирование истечения идеальной жидкости из резервуара / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев, И. В. Ходаков // Труды XVI Международного симпозиума МДОЗМФ-2013. – Харьков–Херсон, 2013. – С. 18–21.

74. Пат. RU 2503891 C2 Российская Федерация МПК F24F 13/08 (2006.01). Способ управления отрывом воздушного потока на входе во всасывающие каналы / О. А. Аверкова, А. К. Логачев, И. Н. Логачев, К. И. Логачев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). – № 2012114363/12; заявл. 11.04.12; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1. – 7 с.

75. Аверкова, О. А. Расчет истечения плоской струи идеальной жидкости / О. А. Аверкова, К. И. Логачев, И. В. Ходаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; Российская Федерация. – № 2013614881. – Дата регистрации 22.05.13.

76. Аверкова, О. А. Расчет отрывного течения на входе в круглый патрубок с экранами / О. А. Аверкова, К. И. Логачев, И. В. Ходаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; Российская Федерация. – № 2013616992. – Дата регистрации 30.07.13.

77. Маклаков, Д. В. Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами / Д. В. Маклаков. – М.: Янус, 1997. – 280 с.

78. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Физматгиз, 1958. – 678 с.

79. Уиттекер, Э. Т. Курс современного анализа: пер. с англ. / Э.Т. Уиттекер, Г. Н. Ватсон // Трансцендентные функции. – М.: Физматгиз, 1963. – Т. 2 – 515 с.

80. Логачев, И. Н. Математическое моделирование движения воздуха в щелевых неплотностях аспирационных укрытий / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, Б. Д. Склад // Математическое моделирование технологических процессов в производстве строительных материалов и конструкций: сб. науч. тр. – Белгород: Изд. БелГТАСМ, 1998. – С. 50–58.

81. Логачев, К. И. Аэродинамика всасывающих факелов / К. И. Логачев – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – 175 с.

82. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.

83. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1977. – 559 с.

84. Ханжонков, В. И. Сопротивление приточных и вытяжных шахт / В. И. Ханжонков // Промышленная аэродинамика. – 1947. – № 3. – С.210–214.

85. Идельчик, И. Е. Гидравлические сопротивления при входе потока в каналы и протекании через отверстия / И. Е. Идельчик // Промышленная аэродинамика: сб. тр.; БНТ, НКАП. – 1944. – № 2. – С. 27–57.

86. Лифанов, И. К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент / И. К. Лифанов. – М.: Янус, 1995. – 520 с.

87. Сабельников, В. А. Численный расчет турбулентного течения на начальном участке плоского канала с острыми кромками методом дискретных вихрей / В. А. Сабельников, Е. А. Смирных // Ученые записки ЦАГИ. – 1985. – Т.XVI. – С.59–64.

88. Зимонт, В. Л. Исследование турбулентного течения на начальном участке цилиндрического канала с острыми кромками / В. Л. Зимонт, В. Е. Козлов, А. А. Прасковский // Ученые записки ЦАГИ. – 1981. – Т.XII, №1. – С.145–152.

89. Белоцерковский, С. М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / С. М. Белоцерковский, А. С. Гиневский. – М.: Физматлит, 1995. – 368 с.

90. Зарипов, Ш. Х. Аспирация аэрозоля в трубку из неподвижной среды / Ш. Х. Зарипов, Л. М. Зигангареева, О. М. Киселев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2000. – № 2. – С. 104–109.

91. Зарипов, Ш. Х. Об аспирации аэрозоля в щель между двумя пластинами / Ш. Х. Зарипов, О. М. Киселев // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 487–491.

92. Гильфанов, А. К. Определение поля концентрации частиц в задаче аспирации аэрозоля в движущемся воздухе / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2008. – № 4. – С. 71–81.

93. Гильфанов, А. К. Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов. – Казань: Казан. ун-т, 2012. – 120 с.

94. Logachev, I. N. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 417 p.

95. Fluent 6.1 Users' Guide, Режим доступа: http://202.185.100.7/homepage/fluent/html/ug/main_pre.htm.

96. J. M. McDonough. Introductory Lectures on Turbulence / J. M. McDonough // Physics, Mathematics and Modeling Режим доступа: <http://www.engr.uky.edu/~acfd/lctr-notes634.pdf>.

97. Пат. RU 97811 С2 Российская Федерация МПК F24F 13/08 (2006.01). Устройство для снижения подсосов через открытые проемы укрытия / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, Ю. Г. Овсянников, Р. Ю. Овсянников, А. С. Семенов; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). – № 2010114522/06; заявл. 12.04.10; опубл. 20.09.10; Бюл. № 26.

98. Пат. RU 2503891 С2 Российская Федерация МПК F24F 13/08 (2006.01). Способ управления отрывом воздушного потока на входе во всасывающие каналы / О. А. Аверкова, А. К. Логачев, И. Н. Логачев, К. И. Логачев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). – № 2012114363/12; заявл. 11.04.12; опубл. 10.01.14; Бюл. № 1. – 7 с.

99. Mises, R. Berechnung von Ausfluss und Ubenfall-Zahlen / R. Mises // Zeitschrift des Vereines Deutscher ingeniere. – Bd. 61, N 21. – 1917.

100. Форхгеймер, Ф. Гидравлика / Ф. Форхгеймер. – М.–Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. – 615 с.

101. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – III изд. – М.: Машиностроение, 1992.
102. Велецкий, Р. К. Измерение параметров пылегазовых потоков в черной металлургии / Р. К. Велецкий, Н. Н. Григина. – М.: Металлургия, 1979.
103. Гильфанов, А. К. Расчет концентраций частиц в задаче аспирации аэрозоля в тонкостенную трубу / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов, Д. В. Маклаков // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2009. – № 6. – С. 89–99.
104. Логачев, К. И. Численный расчет течения вблизи экранированного отсоса-раструба / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, Е. В. Селиванова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2005. – № 6. – С. 53–58.
105. Alden, J. L. Design of Industrial Ventilation Systems / J. L. Alden, J. M. Kane. – N.Y. : Industrial Press, 1982.
106. Струи и несущие поверхности // Моделирование на ЭВМ / В. И. Бабкин, С. М. Белоцерковский, В. В. Гуляев, А. В. Дворак. – М.: Наука, 1989.
107. Васильев, Л. А. Теневые методы / Л. А. Васильев. – М., 1968.
108. Валюс, Н. А. Растровые оптические приборы / Н. А. Валюс. – М., 1966.

Приложения

Приложение А – использование результатов диссертационной работы



ООО «ЖБИ-Восток»
Юр. адрес 454074, г. Челябинск, ул. Героев Танкограда 1/
Факт. адрес 454074, г. Челябинск, ул. Героев Танкограда 1/
ИНН 7447163463 | КПП 744701001 | ОКПО 6130767
ОКАТО 75401364000 | р/сч 4070281010406000089

Банк ЧФ ОАО «СМП Банк»
ИНН 775000548
Адрес банка 454091, г. Челябинск, ул. Пушкина, 5
БИК 04750198
к/сч 3010181000000000098
ОГРН 1097447016512 от 25.11.2009

УТВЕРЖДАЮ:



Директор
Ворошилов И.А.

« 03 » февраля 2015г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

Ходакова Ильи Владимировича

Комиссия в составе:

Председатель – Директор Ворошилов И.А.

Члены комиссии: Главный инженер Филимонов А.Л. Главный энергетик Востряков Ю.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы “Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов” использованы в производственном процессе ООО «ЖБИ-Восток» при разработке плана модернизации системы обеспыливающей вентиляции:

1. Компьютерные программы были задействованы при проектировании всасывающих каналов;
2. При расчетах коэффициента местного сопротивления всасывающих отверстий использовались эмпирические и аналитические формулы;
3. Оборудование всасывающих круглых каналов механическими экранами привело к увеличению разряжения внутри каналов, что позволит установить вентиляторы меньшей мощности.

Использование указанных результатов позволяет понизить энергоемкость всей системы обеспыливающей вентиляции.

Председатель комиссии

Директор

Ворошилов И.А.

Члены комиссии:

Главный инженер

Филимонов А.Л.

Главный энергетик

Востряков Ю.С.

УТВЕРЖДАЮ:

 Операционный директор
 Зинин С.И.

 «26» марта 2015 г.


АКТ

о практическом использовании результатов исследования
 в сфере подготовки сырьевых материалов при производстве цемента.

Комиссия в составе:

Председатель – Операционный директор Зинин С.И.

Члены комиссии: Директор по ремонту Хорошенин А.В., Главный механик Денисов А.Л.

настоящим подтверждает, что результаты диссертационной работы, полученные Ходаковым Ильей Владимировичем при выполнении кандидатского диссертационного исследования на тему: «Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов» были внедрены на производстве ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» для проектирования вытяжных каналов и для реконструкции аспирационной системы перегрузки сыпучих материалов на основании разработанных методов математического моделирования для расчета отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов и данных экспериментальных исследований влияния механических экранов на коэффициент местного сопротивления щелевой не плотности.

Председатель комиссии:

Операционный директор

Зинин С.И.

Члены комиссии:

Директор по ремонту

Хорошенин А.В.

Главный механик

Денисов А.Л.

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор БГТУ имени В.Г. Шухова

С.Н. Глаголев

2015 г.**СПРАВКА****о внедрении результатов диссертационного исследования**

Основные результаты кандидатской диссертационной работы «Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов» Ходакова Ильи Владимировича внедрены в учебный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова для чтения курсов по предметам "Математическое моделирование" для магистров по направлению "Строительство"; "Аэродинамика вентиляции и механика аэрозолей" для бакалавров по направлению "Строительство", профилю "Теплогазоснабжение и вентиляция"

Научный руководитель,

д.т.н., профессор

К.И. Логачев

Директор архитектурно-строительного института,

д.т.н., профессор

В.А. Уваров

Приложение Б - Методы исследования

Измерение температуры газов

Температуру газа необходимо знать для расчета параметров газа: плотности, влагосодержания, скорости, расхода и запыленности. Температуру измеряют термометрами расширения, манометрическими термометрами, термопарами.

Проведение замеров

1. Для измерения температуры газа в газоходе прибор вводят внутрь газохода на длину рабочей части через специально приваренные штуцеры. Приборы имеют тепловую инерционность, которая определяется их размерами, массой, теплоемкостью, коэффициентом теплоотдачи, поэтому показания приборов для стандартных термопар и термометров следует снимать через 5 мин, для термопар с открытым спаем - через 30 - 60с.

2. При наличии в газе капельной влаги датчик температуры должен быть защищен чехлом от попадания капель на рабочую поверхность.

3. При снятии показаний стеклянных термометров не следует вынимать их из газохода. Применение термометров с разрывами ртутных или спиртовых столбиков не допускается.

Измерение температуры осуществлялось спиртовым термометром с пределом измерений от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$.

Измерение давления

Для определения гидравлического сопротивления газоочистных установок, а также для расчета скорости и расхода газа замеряют полный, динамический и статический напоры.

Сопротивление исследуемых пылеуловителей должно измеряться по перепаду полных давлений перед аппаратами и за ними. Если площади этих сечений равны, равны и скорости в них, а значит, и динамический напор (кинетическая энергия газа).

Поскольку $p_n = p_{cm} + p_{\partial}$, то сопротивление пылеуловителей определяется по разности статических давлений до и после них. Этот способ наиболее точен и наименее трудоемок.

Статический напор чаще всего измеряется через отверстия в стенках газохода, снабженные штуцерами, к которым присоединяются манометры различного типа. С достаточной точностью можно произвести замер в одной точке у стенки газохода, так как практически статический напор мало меняется по сечению. В случае неравномерного поля скоростей газового потока штуцеры должны располагаться по всему периметру сечения, не менее одного на каждую сторону газопровода прямоугольного сечения или четырех - по двум взаимно перпендикулярным осям круглого сечения. Штуцеры кольцевым трубопроводом подсоединяются к прибору.

Если газ находится под давлением, то при стационарном расположении измерительного прибора желательно отключать прибор от штуцера. При временных замерах можно вводить в газоход трубку, при этом срез ее должен быть параллелен направлению газового потока. Косой срез недопустим, так как значительно искажает показания прибора.

Приборы для измерения давления и разрежения получили общее название манометрических. По принципу действия они подразделяются на жидкостные, пружинные и поршневые. В практике пылегазовых измерений употребляются жидкостные манометры.

Для измерения разрежений и малых давлений в лабораторной практике используются микроманометры с наклонной шкалой в виде трубки, заполненной жидкостью и являющиеся разновидностью однострубногo чашечного манометра. Точность измерений повышается при наклонном положении трубки вследствие того, что при одних и тех же разности уровней h и давлении длина столба жидкости увеличивается при уменьшении угла наклона к горизонтали. Давление, измеряемое микроманометром с наклонной трубкой, находим из соотношения

$$p = h \cdot \rho \cdot \sin \alpha,$$

где p — измеряемое давление, мм вод. ст.; h — длина столба жидкости по шкале, мм; ρ — плотность рабочей жидкости; α — угол наклона трубки.

Микроманометр с вращающейся измерительной трубкой типа ММН-2400

Микроманометр многопредельный с наклонной трубкой ММН-2400 предназначен для измерения избыточного вакуумметрического давления и разности давлений неагрессивных к стали, латуни и полиэтилену газов в пределах до 2400 Па (240 кгс/см^2) при статическом давлении не более 10000 Па . Цилиндрический резервуар прибора герметично закрыт крышкой, в которой имеется трехходовой кран для подсоединения штуцеров микроманометра к точкам замера разности напоров (со знаками «плюс» и «минус»). Горизонтальная установка прибора регулируется двумя винтовыми ножками с помощью двух взаимно перпендикулярных уровней.

После горизонтальной установки прибора регулятором уровня жидкости, верхняя часть которого выведена над крышкой, выводим на «нуль» уровень жидкости в стеклянной измерительной трубке. Трубка шарнирно соединена с резервуаром и может устанавливаться под различными углами, которые фиксируются пятью отверстиями, обозначенными (0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8). Эти значения представляют собой произведение $\rho_{\text{сп}} \cdot \sin \alpha$; где $\rho_{\text{сп}} = 0,8095 \text{ г/см}^3$ — плотность спирта, по которому тарирован прибор. Таким образом, напор, показываемый микроманометром, равен $p = h \cdot \alpha$ мм вод. ст.

Крышка имеет отверстие для заливки жидкости в резервуар. Для слива жидкости служит кран, подсоединенный к днищу резервуара.

Точность показаний прибора $\pm 1\%$ от верхнего предела измерений.[102]

Замеры динамического давления в трубе производятся при помощи спиртового микроманометра с вращающейся измерительной трубкой типа ММН-2400. Замер разности атмосферного давления и статического давления разрежения в укрытии $P_{\text{атм}} - P_u$ производится с помощью спиртового микроманометра с наклонной измерительной трубкой, угол наклона которой к горизонтали составляет 5° , длина измерительной трубки достигает 1 м. Данный

прибор градуируется в соответствии с ММН-2400. Большая длина трубки и небольшой угол наклона позволяют измерить колебания давлений, которые невозможно уловить с помощью микроманометра ММН-2400.

Шлирен-метод

Метод Тёплера – это метод, позволяющий обнаружить оптические неоднородности в преломляющихся прозрачных средах и дефекты поверхностей, отражающих свет. Метод используется для нахождения в оптически прозрачном материале свилей, также для исследования на качество разных оптических деталей, в том числе зеркал. В аэродинамических трубах при обтекании моделей образуются воздушные потоки, распределение плотности которых исследуется с помощью Шлирен-метода. Этот метод применяют для проекции изображений на экран в системах воспроизведения картинки с везикулярных и термопластических фотоматериалов, в пузырьковых камерах и др. данный метод был предложен в 1867 году учёным А. Тёплером.

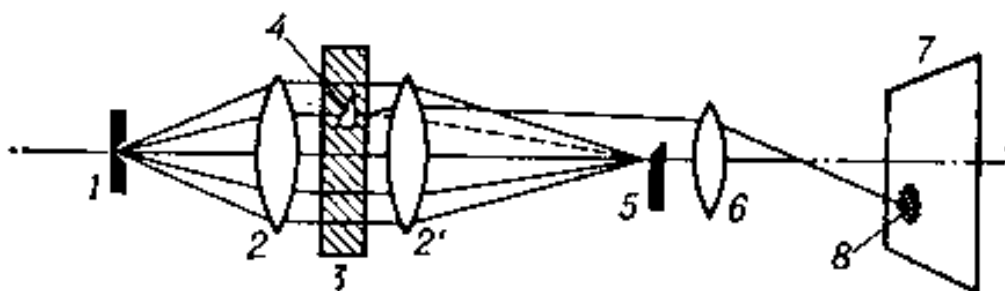


Рисунок 2 - Схема шлирен-метода

В Шлирен-методе пучок света щелевого или точечного источника излучения света (рисунок 1) направляется сквозь исследуемый предмет с помощью линзы или системы зеркал и линз (2—2'). После чего пучок лучей фокусируется на матовой ширме 5 с заостренным краем (на ноже Фуко), таким образом, что воспроизведение источника оказывается на краю ширмы. Все лучи будут задержаны ширмой, в случае отсутствия оптических неоднородностей объекте, который исследуется. Если же оптические неоднородности 4 будут иметь место, то лучи рассеяться, а часть их, слегка отклонившись, будет проходить выше обреза ширмы. Можно спроектировать эти лучи на экран 7, если поставить позади ширмы

проекционный экран 6. В таком случае получится изображение 8 неоднородностей, рассеивавших лучи. Иногда точечный источник света и нож Фуко заменяют оптически сопряжёнными решётками, так называемыми растрами, которые перекрывают движение лучей в случае отсутствия неоднородностей на их пути. Использование решёток со щелями в форме цветных светофильтров позволяет отчётливее понять характер оптических неоднородностей. Без перекрытия решётками или ножом Фуко лучей возможно получение грубоватого (теневого) изображения зон, в которых происходит резкое изменение оптической плотности. Получение стереоскопического изображения распределения неоднородностей внутри объекта возможно при просвечивании предмета двумя оптическими системами, которые установлены друг к другу под некоторым углом [107, 108].

Приложение В - Результаты экспериментальных исследований

Таблица 2 - Исследование влияния длины козырька

длина козырька <i>L</i> (калибр)	$t_{изм}, ^\circ C$	$P_{дин.изм}$ (Па)	$P_{ст.укр.и}$ (Па)	$\rho,$ $кг \cdot м^{-3}$	$V,$ (м/с)	К.М.С.	$\delta, \%$	$G, кг/с$	$\delta_g, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	21	2,2850	0,2157	1,2001	0,5680	1,1145	0,0	0,0184	0,0
0,17	21	2,2752	0,2599	1,2001	0,5668	1,3483	21,0	0,0167	-9,1
0,33	21	2,2752	0,2550	1,2001	0,5668	1,3228	18,7	0,0169	-8,2
0,50	21	2,2752	0,2599	1,2001	0,5668	1,3483	21,0	0,0167	-9,1
0,67	21	2,2752	0,2501	1,2001	0,5668	1,2974	16,4	0,0170	-7,3
0,83	21	2,2752	0,2354	1,2001	0,5668	1,2211	9,6	0,0176	-4,5
1,00	21	2,3144	0,2452	1,2001	0,5716	1,2504	12,2	0,0174	-5,6
1,17	21	2,2752	0,2354	1,2001	0,5668	1,2211	9,6	0,0176	-4,5
1,33	21	2,2556	0,2207	1,2001	0,5643	1,1547	3,6	0,0181	-1,8
1,50	21	2,2556	0,2157	1,2001	0,5643	1,1291	1,3	0,0183	-0,6
1,67	21	2,2556	0,2108	1,2001	0,5643	1,1034	-1,0	0,0185	0,5
1,83	21	2,2556	0,1961	1,2001	0,5643	1,0264	-7,9	0,0192	4,2
2,00	21	2,2556	0,1814	1,2001	0,5643	0,9494	-14,8	0,0199	8,3
2,17	21	2,2556	0,1716	1,2001	0,5643	0,8981	-19,4	0,0205	11,4
2,33	21	2,2163	0,1667	1,2001	0,5594	0,8879	-20,3	0,0206	12,0
2,50	21	2,2360	0,1618	1,2001	0,5619	0,8542	-23,4	0,0210	14,2
0,00	22	2,3144	0,2207	1,1960	0,5726	1,1254	0,0	0,0183	0,0
0,17	22	2,2948	0,2501	1,1960	0,5702	1,2863	14,3	0,0171	-6,5
0,33	22	2,2948	0,2599	1,1960	0,5702	1,3368	18,8	0,0168	-8,2
0,50	22	2,2948	0,2550	1,1960	0,5702	1,3115	16,5	0,0169	-7,4
0,67	22	2,2752	0,2574	1,1960	0,5677	1,3356	18,7	0,0168	-8,2
0,83	22	2,2752	0,2599	1,1960	0,5677	1,3483	19,8	0,0167	-8,6
1,00	22	2,2752	0,2501	1,1960	0,5677	1,2974	15,3	0,0170	-6,9
1,17	22	2,2752	0,2452	1,1960	0,5677	1,2720	13,0	0,0172	-5,9
1,33	22	2,2752	0,2354	1,1960	0,5677	1,2211	8,5	0,0175	-4,0
1,50	22	2,2752	0,2256	1,1960	0,5677	1,1702	4,0	0,0179	-1,9
1,67	22	2,2752	0,2157	1,1960	0,5677	1,1193	-0,5	0,0183	0,3
1,83	22	2,2556	0,2010	1,1960	0,5653	1,0521	-6,5	0,0189	3,4
2,00	22	2,2752	0,1814	1,1960	0,5677	0,9413	-16,4	0,0200	9,3
2,17	22	2,2948	0,1765	1,1960	0,5702	0,9080	-19,3	0,0203	11,3
2,33	22	2,2948	0,1618	1,1960	0,5702	0,8323	-26,0	0,0212	16,3
2,50	22	2,2948	0,1716	1,1960	0,5702	0,8828	-21,6	0,0206	12,9
0,00	21	2,1967	0,1667	1,2001	0,5569	0,8958	0,0	0,0205	0,0
0,17	21	2,1575	0,1961	1,2001	0,5519	1,0731	19,8	0,0187	-8,6
0,33	21	2,1771	0,2010	1,2001	0,5544	1,0900	21,7	0,0186	-9,3
0,50	21	2,1379	0,2059	1,2001	0,5494	1,1371	26,9	0,0182	-11,2
0,67	21	2,1183	0,2059	1,2001	0,5469	1,1476	28,1	0,0181	-11,6
0,83	21	2,1575	0,1961	1,2001	0,5519	1,0731	19,8	0,0187	-8,6
1,00	21	2,1379	0,1961	1,2001	0,5494	1,0829	20,9	0,0186	-9,0
1,17	21	2,1575	0,1961	1,2001	0,5519	1,0731	19,8	0,0187	-8,6
1,33	21	2,1183	0,1912	1,2001	0,5469	1,0656	19,0	0,0188	-8,3
1,50	21	2,0987	0,1863	1,2001	0,5443	1,0480	17,0	0,0190	-7,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,67	21	2,1379	0,1839	1,2001	0,5494	1,0152	13,3	0,0193	-6,1
1,83	21	2,1575	0,1765	1,2001	0,5519	0,9658	7,8	0,0197	-3,7
2,00	21	2,1771	0,1765	1,2001	0,5544	0,9571	6,8	0,0198	-3,3
2,17	21	2,2163	0,1569	1,2001	0,5594	0,8357	-6,7	0,0212	3,5
2,33	21	2,1967	0,1569	1,2001	0,5569	0,8431	-5,9	0,0211	3,1
2,50	21	2,1771	0,1618	1,2001	0,5544	0,8773	-2,1	0,0207	1,0

Таблица 3 - Исследование влияния положения механического экрана - прямоугольной пластины

удаление L (калибр)	Положение экрана (рисунок 6)	$t_{изм}, ^\circ C$	$P_{дин.изм}$ (Па)	$P_{ст.укр.и}$ (Па)	$\rho,$ $кг \cdot м^{-3}$	$V,$ (м/с)	к.м.с.	$\delta, \%$	$G, кг/с$	$\delta_g, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,67	только с козырьком	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
0,67	1	22	2,0006	0,1177	1,1960	0,5324	0,6943	-17,6	0,0185	10,2
0,83	1	22	1,9614	0,1324	1,1960	0,5271	0,7968	-5,5	0,0173	2,9
1,00	1	22	1,9810	0,1373	1,1960	0,5298	0,8181	-3,0	0,0171	1,5
1,17	1	22	1,9614	0,1373	1,1960	0,5271	0,8263	-2,0	0,0170	1,0
1,33	1	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
1,50	1	22	1,9417	0,1373	1,1960	0,5245	0,8346	-1,0	0,0169	0,5
1,67	1	22	1,9025	0,1373	1,1960	0,5192	0,8518	1,0	0,0167	-0,5
1,83	1	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
2,00	1	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
2,17	1	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
2,33	1	22	1,9614	0,1373	1,1960	0,5271	0,8263	-2,0	0,0170	1,0
0,67	только с козырьком	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
0,67	2	22	2,0202	0,0686	1,1960	0,5350	0,4011	-52,4	0,0244	45,0
0,83	2	22	2,0006	0,0981	1,1960	0,5324	0,5786	-31,4	0,0203	20,7
1,00	2	22	1,9810	0,1226	1,1960	0,5298	0,7304	-13,4	0,0181	7,4
1,17	2	22	1,9810	0,1275	1,1960	0,5298	0,7597	-9,9	0,0177	5,4
1,33	2	22	1,9614	0,1324	1,1960	0,5271	0,7968	-5,5	0,0173	2,9
1,50	2	22	1,9614	0,1373	1,1960	0,5271	0,8263	-2,0	0,0170	1,0
1,67	2	22	1,9614	0,1373	1,1960	0,5271	0,8263	-2,0	0,0170	1,0
1,83	2	22	1,9810	0,1373	1,1960	0,5298	0,8181	-3,0	0,0171	1,5
2,00	2	22	1,9810	0,1373	1,1960	0,5298	0,8181	-3,0	0,0171	1,5
2,17	2	22	1,9614	0,1422	1,1960	0,5271	0,8558	1,5	0,0167	-0,7
2,33	2	22	1,9810	0,1422	1,1960	0,5298	0,8473	0,5	0,0168	-0,2
2,50	2	22	2,0006	0,1422	1,1960	0,5324	0,8390	-0,5	0,0169	0,2
2,67	2	22	2,0006	0,1373	1,1960	0,5324	0,8101	-3,9	0,0172	2,0
0,67	только с козырьком	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
0,67	3	22	2,0398	0,1030	1,1960	0,5376	0,5959	-29,3	0,0200	19,0
0,83	3	22	1,9810	0,1373	1,1960	0,5298	0,8181	-3,0	0,0171	1,5
1,00	3	22	1,9614	0,1569	1,1960	0,5271	0,9443	12,0	0,0159	-5,5
1,17	3	22	1,9614	0,1520	1,1960	0,5271	0,9148	8,5	0,0162	-4,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,33	3	22	1,9614	0,1520	1,1960	0,5271	0,9148	8,5	0,0162	-4,0
1,50	3	22	1,9417	0,1520	1,1960	0,5245	0,9240	9,6	0,0161	-4,5
1,67	3	22	1,9417	0,1471	1,1960	0,5245	0,8942	6,1	0,0163	-2,9
1,83	3	22	1,9417	0,1520	1,1960	0,5245	0,9240	9,6	0,0161	-4,5
2,00	3	22	1,9417	0,1422	1,1960	0,5245	0,8644	2,5	0,0166	-1,2
2,17	3	22	1,9417	0,1422	1,1960	0,5245	0,8644	2,5	0,0166	-1,2
2,33	3	22	1,9417	0,1422	1,1960	0,5245	0,8644	2,5	0,0166	-1,2
2,50	3	22	1,9417	0,1373	1,1960	0,5245	0,8346	-1,0	0,0169	0,5
2,67	3	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
2,83	3	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
0,67	только с козырьком	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
0,33	4	22	1,9614	0,1275	1,1960	0,5271	0,7672	-9,0	0,0176	4,8
0,50	4	22	1,9614	0,1422	1,1960	0,5271	0,8558	1,5	0,0167	-0,7
0,67	4	22	1,9221	0,1471	1,1960	0,5218	0,9034	7,1	0,0163	-3,4
0,83	4	22	1,9221	0,1520	1,1960	0,5218	0,9335	10,7	0,0160	-5,0
1,00	4	22	1,9025	0,1520	1,1960	0,5192	0,9431	11,9	0,0159	-5,4
1,17	4	22	1,8633	0,1520	1,1960	0,5138	0,9629	14,2	0,0158	-6,4
1,33	4	22	1,8633	0,1520	1,1960	0,5138	0,9629	14,2	0,0158	-6,4
1,50	4	22	1,8829	0,1471	1,1960	0,5165	0,9222	9,4	0,0161	-4,4
1,67	4	22	1,8829	0,1471	1,1960	0,5165	0,9222	9,4	0,0161	-4,4
1,83	4	22	1,9025	0,1471	1,1960	0,5192	0,9127	8,2	0,0162	-3,9
2,00	4	22	1,9417	0,1422	1,1960	0,5245	0,8644	2,5	0,0166	-1,2
2,17	4	22	1,9221	0,1422	1,1960	0,5218	0,8732	3,6	0,0165	-1,7
2,33	4	22	1,9221	0,1397	1,1960	0,5218	0,8582	1,8	0,0167	-0,9
2,50	4	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0
2,67	4	22	1,9221	0,1373	1,1960	0,5218	0,8431	0,0	0,0168	0,0

Таблица 3 - Исследование влияния прямого двугранного уголка 0,67х0,83 калибра

удаление L (калибр)	положение экрана (рисунок 7)	$t_{изм}, ^\circ C$	$P_{дин.изм}$ (Па)	$P_{ст.укр.и}$ (Па)	$\rho,$ $кг \cdot м^{-3}$	$V,$ (м/с)	к.м.с.	$\delta, \%$	$G, кг/с$	$\delta_g, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,42	только с козырьком	22	2,0202	0,1790	1,1960	0,5350	1,0457	0,0	0,0173	0,0
0,58	1	22	2,0202	0,1790	1,1960	0,5350	1,0457	0,0	0,0173	0,0
0,75	1	22	1,9712	0,1961	1,1960	0,5284	1,1745	12,3	0,0163	-5,6
0,92	1	22	1,9712	0,1986	1,1960	0,5284	1,1892	13,7	0,0162	-6,2
1,08	1	22	1,9712	0,2010	1,1960	0,5284	1,2039	15,1	0,0161	-6,8
1,25	1	22	1,9908	0,1961	1,1960	0,5311	1,1629	11,2	0,0164	-5,2
1,42	1	22	2,0006	0,1912	1,1960	0,5324	1,1283	7,9	0,0166	-3,7
1,58	1	22	2,0104	0,1863	1,1960	0,5337	1,0940	4,6	0,0169	-2,2
1,75	1	22	1,9810	0,1863	1,1960	0,5298	1,1103	6,2	0,0167	-2,9
1,92	1	22	2,0006	0,1863	1,1960	0,5324	1,0994	5,1	0,0168	-2,5
2,08	1	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
2,25	1	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2,42	1	22	2,0398	0,1716	1,1960	0,5376	0,9931	-5,0	0,0177	2,6
0,42	только с козырьком	22	2,0202	0,1790	1,1960	0,5350	1,0457	0,0	0,0173	0,0
0,58	2	22	2,0888	0,1422	1,1960	0,5440	0,8035	-23,2	0,0197	14,1
0,75	2	22	2,0496	0,1618	1,1960	0,5389	0,9319	-10,9	0,0183	5,9
0,92	2	22	2,0594	0,1618	1,1960	0,5401	0,9274	-11,3	0,0183	6,2
1,08	2	22	2,0398	0,1716	1,1960	0,5376	0,9931	-5,0	0,0177	2,6
1,25	2	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
1,42	2	22	2,0398	0,1765	1,1960	0,5376	1,0215	-2,3	0,0175	1,2
1,58	2	22	2,0594	0,1814	1,1960	0,5401	1,0399	-0,6	0,0173	0,3
1,75	2	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
1,92	2	22	2,0398	0,1765	1,1960	0,5376	1,0215	-2,3	0,0175	1,2
2,08	2	22	2,0398	0,1790	1,1960	0,5376	1,0357	-1,0	0,0173	0,5
2,25	2	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
2,42	2	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
0,42	только с козырьком	22	2,0202	0,1790	1,1960	0,5350	1,0457	0,0	0,0173	0,0
0,25	3	22	2,0006	0,1814	1,1960	0,5324	1,0704	2,4	0,0171	-1,2
0,42	3	22	1,9810	0,1814	1,1960	0,5298	1,0810	3,4	0,0170	-1,6
0,58	3	22	1,9810	0,1863	1,1960	0,5298	1,1103	6,2	0,0167	-2,9
0,75	3	22	1,9614	0,1814	1,1960	0,5271	1,0919	4,4	0,0169	-2,1
0,92	3	22	1,9614	0,1814	1,1960	0,5271	1,0919	4,4	0,0169	-2,1
1,08	3	22	1,9614	0,1765	1,1960	0,5271	1,0623	1,6	0,0171	-0,8
1,25	3	22	2,0006	0,1716	1,1960	0,5324	1,0126	-3,2	0,0175	1,6
1,42	3	22	2,0006	0,1716	1,1960	0,5324	1,0126	-3,2	0,0175	1,6
1,58	3	22	2,0006	0,1716	1,1960	0,5324	1,0126	-3,2	0,0175	1,6
1,75	3	22	2,0006	0,1716	1,1960	0,5324	1,0126	-3,2	0,0175	1,6
1,92	3	22	2,0006	0,1667	1,1960	0,5324	0,9837	-5,9	0,0178	3,1
2,08	3	22	2,0202	0,1716	1,1960	0,5350	1,0028	-4,1	0,0176	2,1
2,25	3	22	2,0202	0,1716	1,1960	0,5350	1,0028	-4,1	0,0176	2,1
0,42	только с козырьком	22	2,0202	0,1790	1,1960	0,5350	1,0457	0,0	0,0173	0,0
0,58	4	22	2,0300	0,1471	1,1960	0,5363	0,8553	-18,2	0,0191	10,6
0,75	4	22	2,0006	0,1667	1,1960	0,5324	0,9837	-5,9	0,0178	3,1
0,92	4	22	2,0104	0,1765	1,1960	0,5337	1,0364	-0,9	0,0173	0,4
1,08	4	22	2,0398	0,1863	1,1960	0,5376	1,0782	3,1	0,0170	-1,5
1,25	4	22	2,0398	0,1814	1,1960	0,5376	1,0499	0,4	0,0172	-0,2
1,42	4	22	2,0398	0,1814	1,1960	0,5376	1,0499	0,4	0,0172	-0,2
1,58	4	22	2,0202	0,1765	1,1960	0,5350	1,0314	-1,4	0,0174	0,7
1,75	4	22	2,0398	0,1765	1,1960	0,5376	1,0215	-2,3	0,0175	1,2
1,92	4	22	2,0398	0,1765	1,1960	0,5376	1,0215	-2,3	0,0175	1,2
2,08	4	22	2,0398	0,1765	1,1960	0,5376	1,0215	-2,3	0,0175	1,2
2,25	4	22	2,0202	0,1716	1,1960	0,5350	1,0028	-4,1	0,0176	2,1
2,42	4	22	2,0398	0,1716	1,1960	0,5376	0,9931	-5,0	0,0177	2,6

Таблица 4 – Исследование влияния положения прямого двугранного уголка 0,67х1,4 калибра

удаление L(калибр)	Положение экрана	t _{изм} , °C	P _{дин.изм} (Па)	P _{ст.укр.и} (Па)	ρ, кг·м ⁻³	V, (м/с)	к.м.с.	δ, %	G, кг/с	δ _g , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,42	только с козырьком	21	1,9221	0,1520	1,2001	0,5209	0,9335	0,0	0,0169	0,0
0,58	1	21	1,8437	0,1471	1,2001	0,5102	0,9418	0,9	0,0168	-0,4
0,75	1	21	1,8437	0,1520	1,2001	0,5102	0,9732	4,3	0,0165	-2,1
0,92	1	21	1,8437	0,1618	1,2001	0,5102	1,0360	11,0	0,0160	-5,1
1,08	1	21	1,8437	0,1618	1,2001	0,5102	1,0360	11,0	0,0160	-5,1
1,25	1	21	1,8633	0,1594	1,2001	0,5129	1,0095	8,1	0,0162	-3,8
1,42	1	21	1,8633	0,1569	1,2001	0,5129	0,9940	6,5	0,0163	-3,1
1,58	1	21	1,8437	0,1569	1,2001	0,5102	1,0046	7,6	0,0163	-3,6
1,75	1	21	1,8633	0,1545	1,2001	0,5129	0,9785	4,8	0,0165	-2,3
1,92	1	21	1,8437	0,1520	1,2001	0,5102	0,9732	4,3	0,0165	-2,1
2,08	1	21	1,8437	0,1471	1,2001	0,5102	0,9418	0,9	0,0168	-0,4
2,25	1	21	1,8633	0,1471	1,2001	0,5129	0,9319	-0,2	0,0169	0,1
2,42	1	21	1,8829	0,1471	1,2001	0,5156	0,9222	-1,2	0,0170	0,6
2,58	1	21	1,9221	0,1520	1,2001	0,5209	0,9335	0,0	0,0169	0,0
2,75	1	21	1,8829	0,1520	1,2001	0,5156	0,9529	2,1	0,0167	-1,0
2,92	1	21	1,9025	0,1471	1,2001	0,5183	0,9127	-2,2	0,0171	1,1
3,08	1	21	1,9417	0,1520	1,2001	0,5236	0,9240	-1,0	0,0169	0,5
3,25	1	21	1,9221	0,1520	1,2001	0,5209	0,9335	0,0	0,0169	0,0
3,42	1	21	1,9221	0,1520	1,2001	0,5209	0,9335	0,0	0,0169	0,0
3,58	1	21	1,9221	0,1520	1,2001	0,5209	0,9335	0,0	0,0169	0,0
0,42	только с козырьком	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
0,58	2	21	1,9614	0,0981	1,2001	0,5262	0,5902	-30,7	0,0202	20,1
0,75	2	21	1,9614	0,1177	1,2001	0,5262	0,7082	-16,9	0,0184	9,7
0,92	2	21	1,9221	0,1275	1,2001	0,5209	0,7829	-8,1	0,0175	4,3
1,08	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,25	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,42	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,58	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,75	2	21	1,9221	0,1373	1,2001	0,5209	0,8431	-1,0	0,0169	0,5
1,92	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,08	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,25	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,42	2	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
0,42	только с козырьком	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
0,25	3	21	1,8829	0,1373	1,2001	0,5156	0,8607	1,0	0,0167	-0,5
0,42	3	21	1,8633	0,1422	1,2001	0,5129	0,9008	5,8	0,0163	-2,8
0,58	3	21	1,8829	0,1422	1,2001	0,5156	0,8914	4,7	0,0164	-2,2
0,75	3	21	1,8829	0,1471	1,2001	0,5156	0,9222	8,3	0,0161	-3,9
0,92	3	21	1,8829	0,1471	1,2001	0,5156	0,9222	8,3	0,0161	-3,9
1,08	3	21	1,8829	0,1422	1,2001	0,5156	0,8914	4,7	0,0164	-2,2
1,25	3	21	1,8633	0,1422	1,2001	0,5129	0,9008	5,8	0,0163	-2,8
1,42	3	21	1,8437	0,1422	1,2001	0,5102	0,9104	6,9	0,0162	-3,3

окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,58	3	21	1,8437	0,1422	1,2001	0,5102	0,9104	6,9	0,0162	-3,3
1,75	3	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,92	3	21	1,8829	0,1373	1,2001	0,5156	0,8607	1,0	0,0167	-0,5
2,08	3	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,25	3	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,42	3	21	1,8829	0,1373	1,2001	0,5156	0,8607	1,0	0,0167	-0,5
0,42	только с козырьком	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
0,58	4	21	1,9221	0,1128	1,2001	0,5209	0,6926	-18,7	0,0186	10,9
0,75	4	21	1,8829	0,1324	1,2001	0,5156	0,8300	-2,6	0,0170	1,3
0,92	4	21	1,8633	0,1373	1,2001	0,5129	0,8698	2,1	0,0166	-1,0
1,08	4	21	1,8829	0,1373	1,2001	0,5156	0,8607	1,0	0,0167	-0,5
1,25	4	21	1,9025	0,1422	1,2001	0,5183	0,8822	3,6	0,0165	-1,7
1,42	4	21	1,8829	0,1373	1,2001	0,5156	0,8607	1,0	0,0167	-0,5
1,58	4	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
1,75	4	21	1,9123	0,1373	1,2001	0,5196	0,8475	-0,5	0,0168	0,3
1,92	4	21	1,9221	0,1373	1,2001	0,5209	0,8431	-1,0	0,0169	0,5
2,08	4	21	1,9025	0,1373	1,2001	0,5183	0,8518	0,0	0,0168	0,0
2,25	4	21	1,9221	0,1373	1,2001	0,5209	0,8431	-1,0	0,0169	0,5
2,42	4	21	1,9221	0,1373	1,2001	0,5209	0,8431	-1,0	0,0169	0,5

Таблица 5 - Определение размеров прямого двугранного уголка

Условия	L удаление (калибр)	t _{изм} , °C	P _{дин.изм} (Па)	P _{ст.укр.и} (Па)	ρ, кг·м ⁻³	V, (м/с)	к.м.с.	δ, %	G, кг/с	δ _g , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0182	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,7	0,0163	-10,5
с уголком 1х1см	1,00	18	2,1771	0,2157	1,2125	0,5516	1,1697	8,8	0,0174	-4,1
	1,17	18	2,1379	0,2403	1,2125	0,5466	1,3266	23,3	0,0163	-10,0
	1,33	18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,7	0,0163	-10,5
	1,50	18	2,1575	0,2354	1,2125	0,5491	1,2877	19,7	0,0166	-8,6
	1,67	18	2,1379	0,2305	1,2125	0,5466	1,2724	18,3	0,0167	-8,1
	1,83	18	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	20,8	0,0165	-9,0
	2,00	18	2,1379	0,2305	1,2125	0,5466	1,2724	18,3	0,0167	-8,1
	2,17	18	2,1575	0,2354	1,2125	0,5491	1,2877	19,7	0,0166	-8,6
	2,33	18	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	20,8	0,0165	-9,0
	2,50	18	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	20,8	0,0165	-9,0
	2,67	18	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	20,8	0,0165	-9,0
	2,83	18	2,1575	0,2403	1,2125	0,5491	1,3145	22,2	0,0164	-9,5
	3,00	18	2,1183	0,2403	1,2125	0,5441	1,3389	24,5	0,0163	-10,4
без приспособлений		17,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0179	0,0
только козырек		17,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,6	0,0160	-10,4
с уголком 1х2см	1,00	17,5	2,1771	0,2157	1,2125	0,5516	1,1697	15,7	0,0166	-7,0
	1,17	17,5	2,1379	0,2403	1,2125	0,5466	1,3266	23,4	0,0161	-10,0
	1,33	17,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	15,7	0,0166	-7,0
	1,50	17,5	2,1575	0,2354	1,2125	0,5491	1,2877	14,2	0,0167	-6,4
	1,67	17,5	2,1379	0,2305	1,2125	0,5466	1,2724	16,8	0,0166	-7,5
	1,83	17,5	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	15,7	0,0166	-7,0

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2,00	17,5	2,1379	0,2305	1,2125	0,5466	1,2724	19,4	0,0164	-8,5
	2,17	17,5	2,1575	0,2354	1,2125	0,5491	1,2877	22,0	0,0162	-9,5
	2,33	17,5	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	20,8	0,0163	-9,0
	2,50	17,5	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	24,6	0,0160	-10,4
	2,67	17,5	2,1379	0,2354	1,2125	0,5466	1,2995	26,0	0,0159	-10,9
	2,83	17,5	2,1575	0,2403	1,2125	0,5491	1,3145	26,0	0,0159	-10,9
	3,00	17,5	2,1183	0,2403	1,2125	0,5441	1,3389	24,8	0,0160	-10,5
без приспособлений		17	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		17	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,4	0,0162	-10,0
с уголком 1х3см	1,00	17	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	13,5	0,0169	-6,1
	1,17	17	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	25,9	0,0160	-10,9
	1,33	17	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	19,7	0,0164	-8,6
	1,50	17	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	18,2	0,0165	-8,0
	1,67	17	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	15,7	0,0167	-7,0
	1,83	17	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	15,7	0,0167	-7,0
	2,00	17	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	17,9	0,0166	-7,9
	2,17	17	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	19,3	0,0165	-8,5
	2,33	17	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	21,9	0,0163	-9,4
	2,50	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,4	0,0162	-10,0
	2,67	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,4	0,0162	-10,0
	2,83	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,4	0,0162	-10,0
	3,00	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,4	0,0162	-10,0
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0171	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	21,1	0,0156	-9,1
с уголком 1х4см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	9,7	0,0163	-4,5
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	17,9	0,0158	-7,9
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	17,2	0,0158	-7,6
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	16,0	0,0159	-7,1
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	10,3	0,0163	-4,8
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	12,0	0,0162	-5,5
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	13,4	0,0161	-6,1
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	16,0	0,0159	-7,1
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	18,4	0,0157	-8,1
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,7	0,0154	-10,1
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,7	0,0154	-10,1
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,4	0,0155	-9,6
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,4	0,0155	-9,6
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0166	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	29,9	0,0146	-12,2
с уголком 1х5см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	8,0	0,0160	-3,8
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	24,2	0,0149	-10,3
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	22,6	0,0150	-9,7
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	9,7	0,0158	-4,5
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	7,4	0,0160	-3,5
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	10,3	0,0158	-4,8
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	16,8	0,0154	-7,5
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	19,7	0,0152	-8,6
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	22,6	0,0150	-9,7
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0148	-10,7
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,4	0,0146	-11,8
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,4	0,0146	-11,8

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,4	0,0146	-11,8
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0168	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	17,4	0,0155	-7,7
с уголком 1х6см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-1,5	0,0169	0,7
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	11,2	0,0159	-5,2
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	6,1	0,0163	-2,9
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	-4,0	0,0171	2,1
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	-1,5	0,0169	0,7
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	-3,0	0,0170	1,5
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	2,1	0,0166	-1,0
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	11,0	0,0159	-5,1
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	11,0	0,0159	-5,1
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	14,9	0,0156	-6,7
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	14,3	0,0157	-6,5
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	16,1	0,0156	-7,2
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	14,9	0,0156	-6,7
без приспособлений		17,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0179	0,0
только козырек		17,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,6	0,0160	-10,4
с уголком 2х1см	1,00	17,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	1,6	0,0178	-0,8
	1,17	17,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	26,2	0,0159	-11,0
	1,33	17,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	33,7	0,0155	-13,5
	1,50	17,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	33,7	0,0155	-13,5
	1,67	17,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	28,5	0,0158	-11,8
	1,83	17,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	21,1	0,0163	-9,1
	2,00	17,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	21,1	0,0163	-9,1
	2,17	17,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	22,2	0,0162	-9,6
	2,33	17,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	22,5	0,0162	-9,6
	2,50	17,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,6	0,0161	-10,1
	2,67	17,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,6	0,0161	-10,1
	2,83	17,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,6	0,0161	-10,1
	3,00	17,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,6	0,0161	-10,1
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0185	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,3	0,0166	-10,0
с уголком 2х2см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	7,9	0,0178	-3,7
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	23,3	0,0166	-10,0
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	26,6	0,0164	-11,1
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	22,2	0,0167	-9,5
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	7,9	0,0178	-3,7
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	10,1	0,0176	-4,7
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	13,3	0,0174	-6,1
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	15,5	0,0172	-7,0
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	18,8	0,0170	-8,3
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,3	0,0166	-9,9
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,2	0,0167	-9,5
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,3	0,0166	-10,0
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,8	0,0164	-11,5
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0185	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	27,7	0,0164	-11,5
с уголком 2х3см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	13,3	0,0174	-6,1
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	27,8	0,0164	-11,5
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	31,1	0,0161	-12,7

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	18,8	0,0170	-8,3
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	7,9	0,0178	-3,7
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	10,1	0,0176	-4,7
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	15,5	0,0172	-7,0
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	17,8	0,0170	-7,8
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	20,5	0,0168	-8,9
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,3	0,0166	-9,9
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,7	0,0167	-9,7
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,0	0,0165	-10,5
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0165	-10,7
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0182	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	32,9	0,0158	-13,3
с уголком 2х4см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	9,4	0,0174	-4,4
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	22,8	0,0165	-9,7
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	31,8	0,0159	-12,9
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	25,0	0,0163	-10,6
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	16,1	0,0169	-7,2
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	22,8	0,0165	-9,7
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	23,9	0,0164	-10,2
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	23,9	0,0164	-10,2
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	27,2	0,0162	-11,3
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	29,5	0,0160	-12,1
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,7	0,0159	-12,9
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,9	0,0158	-13,3
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,7	0,0159	-12,9
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	18,7	0,0165	-8,2
с уголком 2х5см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	2,8	0,0178	-1,3
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	10,9	0,0171	-5,0
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	23,3	0,0162	-9,9
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	14,0	0,0169	-6,3
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	16,1	0,0167	-7,2
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	13,8	0,0169	-6,3
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	16,1	0,0167	-7,2
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	12,9	0,0169	-5,9
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	18,5	0,0165	-8,1
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	18,6	0,0165	-8,2
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,9	0,0164	-9,0
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,9	0,0164	-9,0
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,9	0,0164	-9,0
без приспособлений		20,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0181	0,0
только козырек		20,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	29,7	0,0159	-12,2
с уголком 2х6см	1,00	20,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-4,0	0,0185	2,1
	1,17	20,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	18,5	0,0166	-8,1
	1,33	20,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	32,2	0,0158	-13,0
	1,50	20,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	21,8	0,0164	-9,4
	1,67	20,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	23,0	0,0163	-9,8
	1,83	20,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	16,6	0,0168	-7,4
	2,00	20,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	23,0	0,0163	-9,8
	2,17	20,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	23,0	0,0163	-9,8
	2,33	20,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	21,8	0,0164	-9,4

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2,50	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,2	0,0163	-10,3
	2,67	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	26,1	0,0161	-10,9
	2,83	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,3	0,0161	-11,4
	3,00	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,4	0,0159	-12,4
без приспособлений		17	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		17	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,4	0,0162	-10,0
с уголком 3х1см	1,00	17	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	0,0	0,0180	0,0
	1,17	17	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	23,4	0,0162	-10,0
	1,33	17	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	32,3	0,0156	-13,1
	1,50	17	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	37,5	0,0153	-14,7
	1,67	17	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	32,3	0,0156	-13,1
	1,83	17	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	29,7	0,0158	-12,2
	2,00	17	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	24,5	0,0161	-10,4
	2,17	17	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	25,7	0,0160	-10,8
	2,33	17	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	24,5	0,0161	-10,4
	2,50	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0161	-10,4
	2,67	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0161	-10,4
	2,83	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0161	-10,4
	3,00	17	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0161	-10,4
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0184	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	32,3	0,0160	-13,1
с уголком 3х2см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	5,3	0,0179	-2,6
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	27,7	0,0163	-11,5
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	37,1	0,0157	-14,6
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	42,9	0,0154	-16,3
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	37,0	0,0157	-14,6
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	34,7	0,0159	-13,8
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	30,0	0,0161	-12,3
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,7	0,0163	-11,5
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	30,0	0,0161	-12,3
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,0	0,0161	-12,3
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,3	0,0160	-13,1
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,3	0,0160	-13,1
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,0	0,0161	-12,3
без приспособлений		20,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		20,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	28,7	0,0158	-11,9
с уголком 3х3см	1,00	20,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	9,8	0,0171	-4,6
	1,17	20,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	27,5	0,0159	-11,4
	1,33	20,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	33,7	0,0155	-13,5
	1,50	20,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	38,1	0,0153	-14,9
	1,67	20,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	30,0	0,0158	-12,3
	1,83	20,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	28,7	0,0158	-11,9
	2,00	20,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	28,7	0,0158	-11,9
	2,17	20,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,5	0,0159	-11,4
	2,33	20,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	30,0	0,0158	-12,3
	2,50	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,0	0,0158	-12,3
	2,67	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,5	0,0159	-11,4
	2,83	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,6	0,0157	-12,5
	3,00	20,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,6	0,0157	-12,5
без приспособлений		19	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0183	0,0
только козырек		19	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,4	0,0165	-10,0

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
с уголком 3х4см	1,00	19	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	0,0	0,0183	0,0
	1,17	19	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	20,2	0,0167	-8,8
	1,33	19	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	25,6	0,0164	-10,8
	1,50	19	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	35,7	0,0157	-14,2
	1,67	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	26,8	0,0163	-11,2
	1,83	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	22,3	0,0166	-9,6
	2,00	19	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	24,5	0,0164	-10,4
	2,17	19	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	21,2	0,0166	-9,2
	2,33	19	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	23,4	0,0165	-10,0
	2,50	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0164	-10,4
	2,67	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,6	0,0164	-10,8
	2,83	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,6	0,0164	-10,8
	3,00	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,6	0,0164	-10,8
без приспособлений		19	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0185	0,0
только козырек		19	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,7	0,0166	-10,4
с уголком 3х5см	1,00	19	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-2,4	0,0187	1,2
	1,17	19	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	14,2	0,0173	-6,4
	1,33	19	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	18,3	0,0170	-8,1
	1,50	19	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	27,9	0,0163	-11,6
	1,67	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	23,6	0,0166	-10,0
	1,83	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	18,3	0,0170	-8,1
	2,00	19	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	18,3	0,0170	-8,1
	2,17	19	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	21,5	0,0168	-9,3
	2,33	19	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	22,6	0,0167	-9,7
	2,50	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	21,5	0,0168	-9,3
	2,67	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	21,5	0,0168	-9,3
	2,83	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,6	0,0167	-9,7
	3,00	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,6	0,0167	-9,7
без приспособлений		21	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0182	0,0
только козырек		21	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,1	0,0164	-9,9
с уголком 3х6см	1,00	21	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-6,7	0,0188	3,5
	1,17	21	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	9,1	0,0174	-4,3
	1,33	21	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	14,4	0,0170	-6,5
	1,50	21	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	30,7	0,0159	-12,5
	1,67	21	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	20,9	0,0165	-9,1
	1,83	21	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	18,8	0,0167	-8,2
	2,00	21	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	18,8	0,0167	-8,2
	2,17	21	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	19,8	0,0166	-8,7
	2,33	21	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	20,9	0,0165	-9,1
	2,50	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,0	0,0165	-9,5
	2,67	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,9	0,0165	-9,1
	2,83	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,9	0,0165	-9,1
	3,00	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,1	0,0164	-9,9
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0172	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	19,4	0,0157	-8,5
с уголком 4х1см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-1,5	0,0173	0,7
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	20,7	0,0157	-9,0
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	28,9	0,0152	-11,9
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	30,9	0,0150	-12,6
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	23,2	0,0155	-9,9
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	21,3	0,0156	-9,2

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	21,3	0,0156	-9,2
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	19,4	0,0157	-8,5
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	19,4	0,0157	-8,5
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	18,1	0,0158	-8,0
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	18,1	0,0158	-8,0
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	18,1	0,0158	-8,0
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	19,4	0,0157	-8,5
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0182	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	27,2	0,0162	-11,3
с уголком 4х2см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-4,3	0,0187	2,2
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	29,5	0,0160	-12,1
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	31,8	0,0159	-12,9
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	38,6	0,0155	-15,1
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	39,9	0,0154	-15,5
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	34,1	0,0158	-13,6
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	33,0	0,0158	-13,3
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	34,1	0,0158	-13,6
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	34,1	0,0158	-13,6
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,8	0,0159	-12,9
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,8	0,0159	-12,9
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	29,5	0,0160	-12,1
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,8	0,0159	-12,9
без приспособлений		19	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		19	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	27,0	0,0160	-11,3
с уголком 4х3см	1,00	19	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	4,8	0,0176	-2,3
	1,17	19	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	30,6	0,0158	-12,5
	1,33	19	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	37,6	0,0153	-14,8
	1,50	19	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	40,8	0,0152	-15,7
	1,67	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	42,6	0,0151	-16,3
	1,83	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	36,8	0,0154	-14,5
	2,00	19	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	35,0	0,0155	-13,9
	2,17	19	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	31,8	0,0157	-12,9
	2,33	19	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	35,0	0,0155	-13,9
	2,50	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	33,7	0,0156	-13,5
	2,67	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,8	0,0157	-12,9
	2,83	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,1	0,0157	-13,0
	3,00	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	33,4	0,0156	-13,4
без приспособлений		24	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0173	0,0
только козырек		24	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	18,1	0,0159	-8,0
с уголком 4х4см	1,00	24	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-2,8	0,0175	1,4
	1,17	24	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	18,9	0,0158	-8,3
	1,33	24	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	20,9	0,0157	-9,0
	1,50	24	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	28,3	0,0153	-11,7
	1,67	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	26,5	0,0154	-11,1
	1,83	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	24,0	0,0155	-10,2
	2,00	24	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	21,3	0,0157	-9,2
	2,17	24	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	26,8	0,0153	-11,2
	2,33	24	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	24,0	0,0155	-10,2
	2,50	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,8	0,0156	-9,8
	2,67	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0154	-10,7
	2,83	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,3	0,0155	-10,3

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	3,00	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,3	0,0153	-11,7
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0181	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	24,0	0,0162	-10,2
с уголком 4х5см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-3,5	0,0184	1,8
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	18,4	0,0166	-8,1
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	21,7	0,0164	-9,4
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	33,0	0,0157	-13,3
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	25,1	0,0162	-10,6
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	19,4	0,0165	-8,5
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	17,0	0,0167	-7,5
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	25,1	0,0162	-10,6
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	30,9	0,0158	-12,6
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	26,3	0,0161	-11,0
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,7	0,0159	-11,8
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,1	0,0162	-10,6
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,1	0,0162	-10,6
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0180	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	22,8	0,0162	-9,8
с уголком 4х6см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-7,0	0,0187	3,7
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	13,0	0,0169	-5,9
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	15,1	0,0168	-6,8
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	27,3	0,0159	-11,4
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	25,1	0,0161	-10,6
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	24,0	0,0162	-10,2
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	25,2	0,0161	-10,6
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	25,1	0,0161	-10,6
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	20,6	0,0164	-8,9
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,0	0,0162	-10,2
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,5	0,0159	-11,8
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,2	0,0161	-10,6
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,0	0,0162	-10,2
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0169	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	26,9	0,0150	-11,2
с уголком 5х1см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	0,5	0,0168	-0,3
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	25,5	0,0151	-10,7
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	36,0	0,0145	-14,3
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	42,5	0,0141	-16,2
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	41,7	0,0142	-16,0
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	33,9	0,0146	-13,6
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	31,1	0,0147	-12,7
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	33,9	0,0146	-13,6
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	33,2	0,0146	-13,4
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,1	0,0147	-12,7
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,5	0,0146	-13,1
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	29,7	0,0148	-12,2
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,1	0,0147	-12,7
без приспособлений		21,5	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0182	0,0
только козырек		21,5	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	28,4	0,0161	-11,7
с уголком 5х2см	1,00	21,5	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	1,8	0,0181	-0,9
	1,17	21,5	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	28,3	0,0161	-11,7
	1,33	21,5	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	34,1	0,0158	-13,6

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1,50	21,5	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	40,9	0,0154	-15,8
	1,67	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	43,5	0,0152	-16,5
	1,83	21,5	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	38,6	0,0155	-15,1
	2,00	21,5	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	38,6	0,0155	-15,1
	2,17	21,5	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	36,4	0,0156	-14,4
	2,33	21,5	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	34,1	0,0158	-13,6
	2,50	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	35,1	0,0157	-14,0
	2,67	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,9	0,0158	-13,3
	2,83	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	34,1	0,0158	-13,6
	3,00	21,5	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	36,4	0,0156	-14,4
без приспособлений		19	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0183	0,0
только козырек		19	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	29,9	0,0161	-12,3
с уголком 5х3см	1,00	19	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-2,5	0,0186	1,3
	1,17	19	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	28,8	0,0162	-11,9
	1,33	19	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	31,1	0,0160	-12,7
	1,50	19	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	33,3	0,0159	-13,4
	1,67	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	35,7	0,0157	-14,2
	1,83	19	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	40,1	0,0155	-15,5
	2,00	19	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	40,1	0,0155	-15,5
	2,17	19	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	37,9	0,0156	-14,8
	2,33	19	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	29,9	0,0161	-12,3
	2,50	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,6	0,0164	-10,8
	2,67	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	26,6	0,0163	-11,1
	2,83	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,6	0,0164	-10,8
	3,00	19	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,5	0,0164	-10,4
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0179	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	18,6	0,0164	-8,2
с уголком 5х4см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-7,2	0,0186	3,8
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	15,9	0,0166	-7,1
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	22,5	0,0162	-9,6
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	26,8	0,0159	-11,2
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	32,4	0,0156	-13,1
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	29,0	0,0158	-12,0
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	28,0	0,0158	-11,6
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	22,5	0,0162	-9,6
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	23,5	0,0161	-10,0
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,8	0,0160	-10,8
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	21,3	0,0163	-9,2
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	22,5	0,0162	-9,6
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,3	0,0163	-8,8
без приспособлений		24	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0167	0,0
только козырек		24	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	23,3	0,0150	-9,9
с уголком 5х5см	1,00	24	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-2,8	0,0169	1,4
	1,17	24	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	15,1	0,0156	-6,8
	1,33	24	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	22,0	0,0151	-9,4
	1,50	24	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	29,0	0,0147	-12,0
	1,67	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	31,8	0,0145	-12,9
	1,83	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	30,4	0,0146	-12,4
	2,00	24	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	26,1	0,0149	-11,0
	2,17	24	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,5	0,0148	-11,4
	2,33	24	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	24,6	0,0150	-10,4

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2,50	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,0	0,0150	-9,8
	2,67	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,6	0,0150	-10,4
	2,83	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,6	0,0150	-10,4
	3,00	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	24,6	0,0150	-10,4
без приспособлений		24	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0174	0,0
только козырек		24	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	22,2	0,0157	-9,5
с уголком 5х6см	1,00	24	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-1,8	0,0175	0,9
	1,17	24	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	17,8	0,0160	-7,9
	1,33	24	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	19,4	0,0159	-8,5
	1,50	24	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	25,8	0,0155	-10,8
	1,67	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	34,4	0,0150	-13,7
	1,83	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	27,1	0,0154	-11,3
	2,00	24	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	28,7	0,0153	-11,8
	2,17	24	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,4	0,0154	-11,4
	2,33	24	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	28,7	0,0153	-11,8
	2,50	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,7	0,0153	-11,8
	2,67	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,8	0,0155	-10,8
	2,83	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,7	0,0153	-11,8
	3,00	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,0	0,0152	-12,3
без приспособлений		18	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0168	0,0
только козырек		18	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	20,9	0,0153	-9,1
с уголком 6х1см	1,00	18	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-6,2	0,0173	3,3
	1,17	18	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	17,0	0,0155	-7,6
	1,33	18	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	29,1	0,0148	-12,0
	1,50	18	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	37,3	0,0143	-14,7
	1,67	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	36,6	0,0144	-14,4
	1,83	18	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	34,6	0,0145	-13,8
	2,00	18	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	31,8	0,0146	-12,9
	2,17	18	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	31,8	0,0146	-12,9
	2,33	18	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	30,4	0,0147	-12,4
	2,50	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,7	0,0148	-11,5
	2,67	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,7	0,0148	-11,5
	2,83	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,7	0,0148	-11,5
	3,00	18	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,7	0,0148	-11,5
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0178	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	25,7	0,0159	-10,8
с уголком 6х2см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-2,2	0,0180	1,1
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	18,7	0,0164	-8,2
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	26,9	0,0158	-11,2
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	38,3	0,0152	-15,0
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	42,4	0,0149	-16,2
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	37,6	0,0152	-14,8
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	42,0	0,0150	-16,1
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	39,7	0,0151	-15,4
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	37,4	0,0152	-14,7
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	32,7	0,0155	-13,2
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,4	0,0156	-12,4
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	34,0	0,0154	-13,6
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,2	0,0156	-12,4
без приспособлений		21	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0183	0,0
только козырек		21	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	17,6	0,0168	-7,8

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
с уголком 6х3см	1,00	21	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-5,4	0,0188	2,8
	1,17	21	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	20,9	0,0166	-9,0
	1,33	21	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	26,3	0,0163	-11,0
	1,50	21	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	36,3	0,0156	-14,3
	1,67	21	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	36,3	0,0156	-14,3
	1,83	21	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	37,2	0,0156	-14,6
	2,00	21	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	34,1	0,0158	-13,6
	2,17	21	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	31,9	0,0159	-12,9
	2,33	21	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	31,9	0,0159	-12,9
	2,50	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	31,9	0,0159	-12,9
	2,67	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,7	0,0160	-12,5
	2,83	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	28,7	0,0161	-11,8
	3,00	21	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,1	0,0165	-9,9
без приспособлений		22	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0181	0,0
только козырек		22	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	22,8	0,0163	-9,8
с уголком 6х4см	1,00	22	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-5,7	0,0186	3,0
	1,17	22	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	22,8	0,0163	-9,8
	1,33	22	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	25,1	0,0162	-10,6
	1,50	22	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	32,1	0,0157	-13,0
	1,67	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	41,4	0,0152	-15,9
	1,83	22	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	39,0	0,0153	-15,2
	2,00	22	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	35,5	0,0155	-14,1
	2,17	22	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	36,7	0,0155	-14,5
	2,33	22	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	34,4	0,0156	-13,7
	2,50	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	30,9	0,0158	-12,6
	2,67	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	29,6	0,0159	-12,2
	2,83	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	29,6	0,0159	-12,2
	3,00	22	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	27,4	0,0160	-11,4
без приспособлений		24	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0174	0,0
только козырек		24	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	21,5	0,0158	-9,3
с уголком 6х5см	1,00	24	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-5,3	0,0179	2,7
	1,17	24	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	14,2	0,0163	-6,4
	1,33	24	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	22,4	0,0158	-9,6
	1,50	24	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	24,9	0,0156	-10,5
	1,67	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	38,0	0,0149	-14,9
	1,83	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	29,4	0,0153	-12,1
	2,00	24	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	26,8	0,0155	-11,2
	2,17	24	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,0	0,0155	-11,3
	2,33	24	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	22,7	0,0157	-9,7
	2,50	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	21,9	0,0158	-9,4
	2,67	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0156	-10,7
	2,83	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0156	-10,7
	3,00	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	25,5	0,0156	-10,7
без приспособлений		24	2,2065	0,2010	1,2125	0,5553	1,0755	0,0	0,0174	0,0
только козырек		24	2,1575	0,2452	1,2125	0,5491	1,3413	18,8	0,0160	-8,2
с уголком 6х6см	1,00	24	2,1379	0,2207	1,2166	0,5457	1,2183	-12,3	0,0186	6,8
	1,17	24	2,0987	0,2403	1,2166	0,5406	1,3514	11,6	0,0165	-5,3
	1,33	24	2,1183	0,2305	1,2166	0,5431	1,2842	17,6	0,0161	-7,8
	1,50	24	2,0987	0,2256	1,2166	0,5406	1,2686	19,9	0,0159	-8,7
	1,67	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	29,8	0,0153	-12,2
	1,83	24	2,0987	0,2207	1,2166	0,5406	1,2411	31,3	0,0152	-12,7

окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2,00	24	2,0594	0,2207	1,2166	0,5355	1,2647	28,5	0,0154	-11,8
	2,17	24	2,0790	0,2256	1,2166	0,5381	1,2806	27,0	0,0155	-11,3
	2,33	24	2,0790	0,2305	1,2166	0,5381	1,3084	23,1	0,0157	-9,9
	2,50	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,1	0,0157	-9,9
	2,67	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	23,1	0,0157	-9,9
	2,83	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	20,3	0,0159	-8,8
	3,00	24	2,0987	0,2354	1,2166	0,5406	1,3238	21,9	0,0158	-9,4