

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

На правах рукописи

Логачев Артур Константинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА МЕСТНЫХ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ОТСОСОВ ОТКРЫТОГО ТИПА**

05.23.03 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Белгород – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА	
МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ОТКРЫТОГО ТИПА.....	13
1.1. Методы расчёта безотрывных течений.....	13
1.2. Методы расчёта отрывных течений.....	18
1.3. О критериях эффективности местных отсосов-раструбов.....	41
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ.....	43
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ КРУГЛОГО	
МЕСТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА,	
РАСПОЛОЖЕННОГО НАД НЕПРОНИЦАЕМОЙ ПЛОСКОСТЬЮ.....	
2.1. Математическая модель и вычислительный алгоритм расчета.....	45
2.2. Движение пылевых частиц в воздушном потоке.....	53
2.3. Характеристики отрывной области.....	63
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ.....	66
3. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ	
С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА.....	
3.1. Разработка вычислительного алгоритма расчета воздушного потока	
вблизи круглого вытяжного патрубка.....	68
3.1.1. Описание вычислительного алгоритма.....	68
3.1.2. Верификация метода расчета.....	70
3.2. Расчёт отрывного воздушного течения вблизи круглого	
всасывающего патрубка.....	76
3.3. Моделирование динамики пылевого аэрозоля.....	81
вблизи тонкостенного отсоса-раструба при наличии набегающего потока.....	81
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ.....	93
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ	
ВБЛИЗИ КРУГЛЫХ ОТСОСОВ - РАСТРУБОВ.....	
4.1. Описание экспериментальной установки.....	94
4.2. Круглая всасывающая труба.....	98
4.3. Отсос-раструб длиной в пять калибров.....	101

4.4. Отсос-раструб длиной в три калибра	105
4.5. Отсос-раструб длиной в два калибра	110
4.6. Отсос-раструб длиной в один калибр	114
4.7. Обсуждение полученных результатов	119
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	122
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНО-СТРУЙНЫХ	123
ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА	123
5.1. Моделирование воздушно-струйного экранирования отсоса кольцевой приточной струёй методом многоугольных вихревых рамок	123
5.1.1. Постановка задачи и описание алгоритма расчёта	123
5.1.2. Обсуждение результатов вычислительного эксперимента	126
5.2. Численное моделирование течения вблизи круглого всасывающего канала, экранированного кольцевой закрученной струёй	133
5.2.1. Разработка математической модели закрученной кольцевой струи	133
5.2.2. Оценка эффекта экранирования закрученной кольцевой струёй на зону действия круглого вытяжного канала	142
ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152
ПРИЛОЖЕНИЯ	167
Приложение А – Листинг программы для ЭВМ расчета отрывного пылевоздушного течения вблизи круглого вытяжного патрубка в условиях внешнего набегающего потока	167
Приложение Б – Листинг программы для ЭВМ расчёта течения вблизи приточно-вытяжного устройства	183
Приложение В – Таблицы поля скоростей вблизи местных отсосов	221
Приложение Г – документы о внедрении результатов диссертационного исследования	229

Условные обозначения:

A – коэффициент аспирации;

a – длина отрывной области при входе в раструб;

a_0 – длина выноса струи за раструб;

b – ширина отрывной области при входе в раструб;

d – длина раструба;

d_e – эквивалентный диаметр частицы пыли;

$G(x, \xi)$ – функция влияния на точку x вихря, расположенного в токе ξ ;

$k = V_a / V_0$ – коэффициент улавливания;

l – характерный размер отрывной области равный расстоянию от сечения с максимальной шириной отрывной области до кромки раструба;

N, N_s – количество присоединённых и свободных вихрей (колец)

соответственно;

R – радиус всасывающего патрубка;

r_h – шаг дискретности;

R_3 – радиус эффективного всасывания;

S – граница рассматриваемой области течения;

S_0 – интенсивность закрутки;

x^p – расчётная точка, $p = 1, 2, \dots, N$;

V_a – объём аспирации;

V_0 – объём аспирации всасывающего круглого патрубка.

\mathbf{v}_a – вектор скорости воздушного потока;

\mathbf{v}_p – вектор скорости пылевой частицы;

$v_n(x)$ – проекция вектора скорости в точке $x(x_1, x_2)$ на направление \mathbf{n} ;

v_0, v_p, v_e – средние скорости: во всасывающем патрубке, в сечении раструба,

эффективного всасывания;

v_c – скорость в центре раструба;

v_{∞} – скорость набегающего потока;

α – угол раскрытия раструба;

$\beta = \alpha / 2$ – угол наклона раструба к оси симметрии;

χ – коэффициент формы частицы;

Δt – шаг по времени;

ε – погрешность вычислений;

$\Gamma(\xi)$ – интенсивность вихря в точке ξ ;

$\gamma = \text{const}$ – интенсивность свободного вихревого слоя;

$\gamma^{l\tau}$ – циркуляция вихря, сошедшего в поток с l -й острой кромки, расположенного

в точке ζ^{τ} в модельный момент времени τ ;

η - коэффициент неравномерности, равный отношению скорости в центре раструба к средней скорости;

μ – динамическая вязкость воздуха.

ξ – точка границы S ;

$\xi^q(\xi_1, \xi_2)$ - координаты q -го присоединённого (граничного) вихревого кольца;

φ - потенциал;

ρ_a – плотность воздуха;

ρ_p – плотность частицы пыли;

ψ – коэффициент сопротивления воздушного потока движению частицы пыли.

Критерии подобия:

Stk – число Стокса;

Re – число Рейнольдса.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. Системы местной вытяжной вентиляции нашли широкое применение во всех отраслях промышленности для эффективного улавливания пылегазовых выбросов. Мощность электродвигателя тягодутьевых средств системы местной вытяжной вентиляции прямо пропорциональна расходу воздуха, удаляемым вентилятором. Актуальной задачей является разработка методов расчета пылевоздушных течений вблизи местных вытяжных устройств и повышения скорости воздуха в спектрах всасывания, что позволит эффективно улавливать пылевые выбросы при меньших расходах удаляемого воздуха.

Наиболее простым и распространённым местным вентиляционным отсосом является всасывающий зонт, или по терминологии И.Е. Идельчика и В.Н. Посохина, отсос-раструб. Профилирование кромок входа в местный вентиляционный отсос-раструб позволит снизить шум и аэродинамическое сопротивление входа во всасывающий проём за счет устранения вихревой зоны, возникающей в результате отрыва потока с острых кромок раструба. Устранение вихревой зоны предотвратит вынос, циркулирующих в ней загрязняющих веществ, в окружающее пространство и повысит эффективность улавливания местного отсоса. Для определения границ профилирования необходимо знать формы отрывных областей на входе в отсос. Поэтому, актуальным является развитие методов расчета отрывных течений в спектрах всасывания и динамики пылевых частиц в них.

Для повышения дальности действия местных отсосов-раструбов представляет интерес определить влияние угла раскрытия и длины раструба на поле скоростей воздушного потока. Перспективным направлением повышения эффективности местных отсосов является воздушно-струйное экранирование, которое не только позволит существенно повысить дальность их действия и скорость подтекающего воздуха, но и снизить объёмы компенсационного воздуха, необходимого при эксплуатации вытяжной вентиляции.

Данное научное направление поддержано грантами Президента РФ (проекты НШ–588.2012.8, МД-95.2017.8) и РФФИ (проекты № 14-41-08005p_офи_м, № 16-08-00074а).

Степень разработанности темы. Моделированию течений в спектрах действия местных отсосов, а также их совершенствованию посвящены труды Азарова В.Н., Батурина В.В., Беспалова В.И., Боровкова Д.П., Гиль Б.Л., Гильфанова А.К., Гримитлина А.М., Дацюк Т.А., Должикова В. Н., Зайцева О.Н., Зарипова Ш.Х., Зиганшина А.М., Ивенского В.Г., Конышева И.И., Коптева Д.В., Лившица Г.Д., Посохина В.Н., Пузанок А.И., Сафиуллина Р.Г., Талиева В.Н., Таурит В.Р., Уляшевой В.М., Фиалковской Т.А., Шепелева И.А., Alden J.L., Flynn M.R., Penot F., Pavlović M.D. и многих др.

Заявленная тематика совершенствования методов расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа подразумевает разработку метода определения границы отрывной области и поля скоростей при входе в круглый отсос-раструб с учётом набегающего воздушного потока и непроницаемой плоскости, а также метода расчета течения вблизи местного отсоса, экранированного кольцевой воздушной струёй при разной степени ее закрутки.

Цель исследования заключается в совершенствовании методов расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа с учётом набегающего потока, непроницаемой плоскости и воздушно-струйного экранирования.

Задачи исследования:

– разработать метод расчёта пылевоздушных течений вблизи отсоса-раструба, расположенного над непроницаемой плоскостью; определить закономерности изменения коэффициента улавливания для пылевых частиц разных фракций;

– разработать метод расчета отрывного течения при входе во всасывающий патрубок с учётом набегающего потока, позволяющий определять поле скоростей воздушного потока, строить предельные траектории пылевых частиц и определять

их коэффициент аспирации; произвести расчёт размеров отрывной области для разных величин скорости и направления набегающего воздушного потока;

– разработать метод расчета отрывного течения на входе в отсос-раструб с учётом набегающего на него внешнего воздушного потока и наличия пылевых частиц; выявить закономерности изменения коэффициента аспирации при разных числах Стокса, скорости набегающего потока, размеров раструба;

– разработать экспериментальную установку и выявить закономерности изменения отрыва потока и поля скоростей воздушных потоков на входе в круглые отсосы-раструбы при разных длинах и углах наклона раструба; определить степень достоверности и адекватности разработанной математической модели;

– при помощи дискретных вихревых многоугольных рамок разработать математическую модель движения воздуха вблизи круглого отсоса, экранированного турбулентной струёй, истекающей из кольцевого отверстия, охватывающего вытяжное отверстие; определить режимно-технические характеристики приточно-вытяжного устройства, способствующие повышению эффективности этого устройства;

– разработать математическую модель течения вблизи, экранированного кольцевой закрученной струёй, круглого всасывающего канала для определения влияния закрутки струи на дальное действие всасывающего факела.

Объект исследования – местные вентиляционные отсосы открытого типа.

Предмет исследования – процессы отрыва потока и улавливания пылевых частиц, поле скоростей во всасывающем факеле.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих результатов:

1. Разработан метод расчета отрывных воздушных течений вблизи круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью, позволяющий определять поле скоростей воздушных потоков, форму отрывной области, строить траектории пылевых частиц.

2. При помощи вычислительного эксперимента определены закономерности изменения формы отрывной области на входе в круглые отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью; предложены формулы для их расчета; введён коэффициент улавливания пылевых частиц, позволяющий оценить эффективность местного отсоса.

3. Разработан метод расчёта отрывных воздушных течений вблизи отсосов-раструбов, в условиях набегающего потока. При разных числах Стокса, длинах и углах наклона раструба, скорости набегающего потока определены коэффициенты аспирации частиц пыли.

4. Выявлены экспериментальные закономерности изменения размеров отрывной области в отсосе-раструбе и поля скоростей воздуха в зависимости от угла наклона и длины раструба.

5. Разработан метод расчета приточно-вытяжных устройств. Определены режимно-технические характеристики местного отсоса, экранированного приточной прямоточной кольцевой струёй, позволяющие увеличить зону действия всасывающего факела.

6. Разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование экранирования круглого отсоса закрученной кольцевой струёй при помощи уравнений Рейнольдса и моделей переноса сдвиговых напряжений (SST), в том числе с поправкой на кривизну и вращение.

Методологической основой диссертационного исследования являются современные численные методы вихревой аэродинамики, математического моделирования, решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Используются отечественные и зарубежные статьи и монографии, специализированные программные комплексы.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: 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».

Теоретическая значимость работы состоит в совершенствовании методов расчёта пылевоздушных течений вблизи местных вентиляционных отсосов-раструбов, а также вытяжных раструбов, экранированных закрученными кольцевыми струями.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в:

– разработке программно-алгоритмического обеспечения для расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017614491, 2017618651 РФ), при помощи которого, в частности, производились расчёты отрывного течения вблизи круглых и щелевидных отсосов, экранированных тонкими профилями, что позволило разработать патент на способ управления отрыва потоком (Пат. RU 2503891);

– определении границ вихревых областей на входе в местные отсосы-раструбы, профилирование по которым позволит улучшить их аэродинамические и акустические свойства;

– выявленных режимно-технических характеристиках эффективных местных вентиляционных отсосов.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс для магистрантов по направлению «Строительство» в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова и практику проектирования систем вытяжной вентиляции проектных организаций ООО «Дом и Ко», ООО «Институт «БелАгроПроект».

Апробация работы: результаты диссертационного исследования апробированы на следующих конгрессах и конференциях: ECCOMAS 2012,

Vienna, Austria; PARTICLES 2015, Barcelona, Spain; ECCOMAS 2016, Greece; ICVFM 2016, Rostock, Germany; Международный молодёжный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2017» (Москва, МГУ им М.В.Ломоносова); «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», 2017, Москва, МГСУ; Региональная научно-техническая конференция РФФИ и Правительства Белгородской области, 2017, Белгород, БГТУ им. В.Г.Шухова; «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века», 2017, Казань: КФУ.

Положения, выносимые на защиту:

- метод расчета отрывных пылевоздушных течений вблизи круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью;
- выявленные закономерности изменения формы отрывной области на входе в круглые отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью; аналитическая зависимость для их расчета; предложенный для оценки эффективности отсоса-раструба коэффициент улавливания пылевых частиц;
- метод расчёта отрывных воздушных течений вблизи отсосов-раструбов, в условиях набегающего потока; закономерности изменения коэффициента аспирации пылевых частиц при разных числах Стокса, длинах и углах наклона раструба;
- экспериментальные закономерности изменения размеров отрывной области в отсосе-раструбе и поля скоростей воздуха в зависимости от угла наклона и длины раструба;
- метод расчета приточно-вытяжных устройств; закономерности изменения осевой скорости вблизи местного отсоса, экранированного приточной прямоточной кольцевой струёй;
- математическая модель и результаты компьютерного моделирования воздушного течения у круглого отсоса, экранированного закрученной кольцевой струёй.

Достоверность результатов обоснована использованием современных методов вычислительной математики и аэродинамики, подтверждается

согласованием результатов вычислительных, натуральных экспериментов и данных других авторов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ, из которых 5 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, 5 статей проиндексированы в Web of Science и Scopus, 1 патент, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 134 наименований и четырёх приложений, изложена на 231 страницах, содержит 140 рисунков, 19 таблиц.

Во введении раскрыты актуальность темы исследований и степень её разработанности, приведены цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость и данные о реализации результатов исследований.

В первой главе изложен обзор методов расчета пылевоздушных течений вблизи местных отсосов открытого типа. Отмечены ранее не решённые задачи.

Во второй главе осуществлена разработка метода моделирования отрывных пылевоздушных течений на входе в местные отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью; определены закономерности изменения отрывной области и коэффициента улавливания пылевых частиц от угла раскрытия, длины раструба и расстояния до непроницаемой плоскости.

В третьей главе развит метод расчета пылевоздушных потоков вблизи всасывающих каналов круглой формы и местных отсосов-раструбов с учётом набегающего потока.

В четвертой главе излагаются результаты экспериментального исследования отрывного течения вблизи круглого отсоса-раструба. Производится сравнение расчётных и экспериментально найденных величин скорости воздушного потока.

В пятой главе рассматривается задача воздушно-струйного экранирования местного отсоса прямоточными и закрученными воздушными струями.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ОТКРЫТОГО ТИПА

Результаты моделирования пылевоздушных потоков вблизи местных отсосов изложены в сотнях научных трудов. В частности, в монографиях [1-14], учебных пособиях [15-19] и диссертациях [20-25] достаточно полно приведены аналитические обзоры методов расчета течений вблизи местных вентиляционных отсосов разных типов, а также методов их конструирования и проектирования.

В данном обзоре кратко рассмотрим применяемые для расчета местных отсосов открытого типа методы и критерии их эффективности, а также современные статьи, вышедшие за последние годы.

Для расчета течений вблизи всасывающих отверстий местных отсосов применяют в основном методы теории идеальной несжимаемой жидкости. Скорости воздуха здесь значительно меньше 70 м/с, поэтому сжимаемость среды не учитывается. Поскольку подтекание воздуха к вытяжному отверстию плавное, ламинарное, то вязкость воздуха не учитывалась и расчёты велись и ведутся в предположении идеальности жидкости и существования потенциала течения. Отрыв потока с острых кромок местных отсосов приводит к образованию вихревых областей, которые можно рассчитывать как в рамках теории струй идеальной несжимаемой жидкости [26], так и с учётом вязкости [27, 28].

1.1. Методы расчёта безотрывных течений

Моделирование безотрывных течений на входе во всасывающие каналы осуществлялись методом наложения потоков [2,3,8,9,19,20], непосредственным решением уравнения Лапласа [29], методом конформных отображений [1,8], методом вихревой, магнитной или электрогидродинамической аналогий [30,31], методом граничных элементов [3, 4, 18, 19-23, 28, 32-36].

Методом наложения потоков определялась оптимальная форма всасывающего отверстия, встроенного в плоскую стенку. Рассматривались щелевидные, круглые, кольцевые, прямоугольные, квадратные, эллиптические и многоугольные отверстия. Поле скоростей вблизи таких отверстий определялось решением уравнения Лапласа. Для расчета течений вблизи всасывающих патрубков разной формы использовались методы вихревой или магнитной аналогии. Метод электрогидродинамической аналогии применим для расчета плоских потенциальных течений со сложными границами.

Методом конформных отображений производился расчёт безотрывных течений на входе в щелевидные всасывающие каналы, расположенные в плоской стенке и неограниченном пространстве [1,3,19], а также отсосов-раструбов [20]. В последнем случае определялась зависимость осевой скорости воздуха вблизи отсоса-раструба от угла раскрытия и длины раструба, который в этой работе назывался козырьком. Установлено, что наибольшая осевая скорость подтекания к отсосу наблюдается при угле раскрытия раструба 180° , или при угле наклона козырька 90° . В работах [43-44] при помощи метода конформных отображений решались задачи воздухообмена в помещениях с тонкими козырьками. В классической книге [45] приведена задача обтекания тонкого козырька набегающим потоком, решение которой затем было использовано в статье [43]. Очевидно, что не учёт вихревых областей, возникающих при срыве потока с острых кромок козырьков, приводит к значительным погрешностям.

Расчёт методом граничных элементов разные авторы называли по-разному – метод особенностей [33-36], обобщённый метод наложения элементарных потоков [37], метод сингулярных или граничных интегральных уравнений [3,4,42]. Эти методом возможен расчёт плоских и пространственных течений со сложными границами, в том числе и в многосвязных областях. Отрыв потока в рамках этого метода не производится, но плоские циркуляционные течения возможно организовать искусственно, путём расположения в расчётной области точечных (линейных) вихрей [4,18,19,21,23,24,38,39,40]. Расчёт пылевоздушных

течений в спектрах действия пылесосных насадок систем вакуумной пылеуборки был произведён в работах [41,42] с помощью компьютерной программы, разработанной в работе [3].

В монографии [6] в безотрывном приближении исследовалось влияние геометрических (конструктивных) параметров отсосов на равномерность поля скоростей входа во всасывающий канал MK_0 (рисунок 1.1).

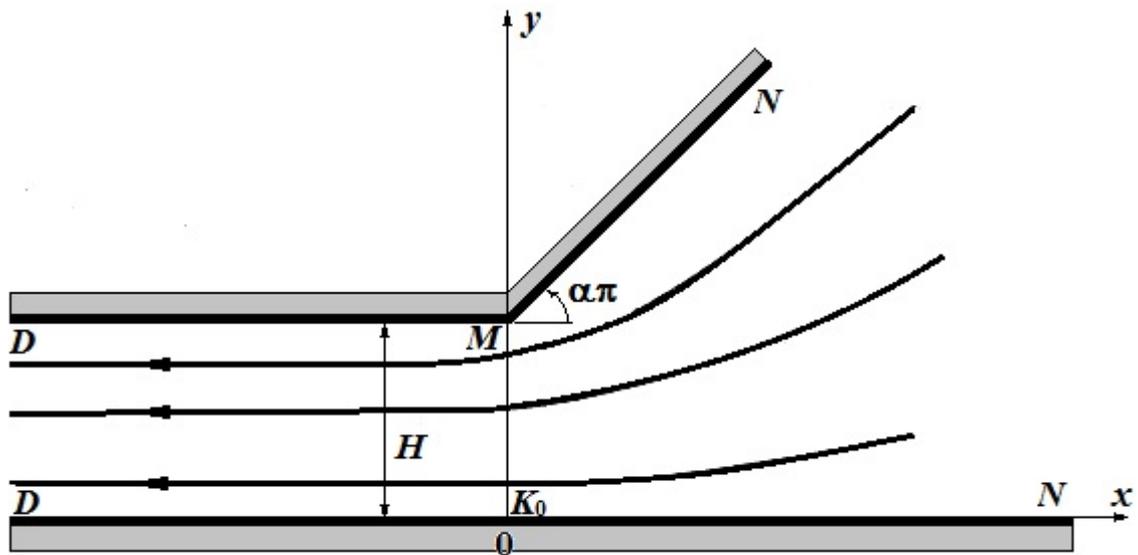


Рисунок 1.1 – Потенциальное течение у бесконечно длинного щелевидного канала

Определено изменение величины критической скорости u_0 в точке K_0 в зависимости от угла наклона α (рисунок 1.2).

Рассмотрен случай, когда всасывающая щель расположена на стенке щелевидного канала (рисунок 1.3). Показано, что наибольшая деформация поля скоростей воздуха на входе в канал MK наблюдается в случае расположения стока в точке M (рисунок 1.4). Для случая угла раскрытия $\alpha = 90^\circ$ и частичном перекрытии входного сечения (рисунок 1.5) зависимость величины критической скорости от удаления всасывающей щели от сечения MK при разных длинах δ / H показан на рисунке 1.6.

Влияние отрыва потока здесь не учитывалось, но как будет показано далее, оно может быть значительным.

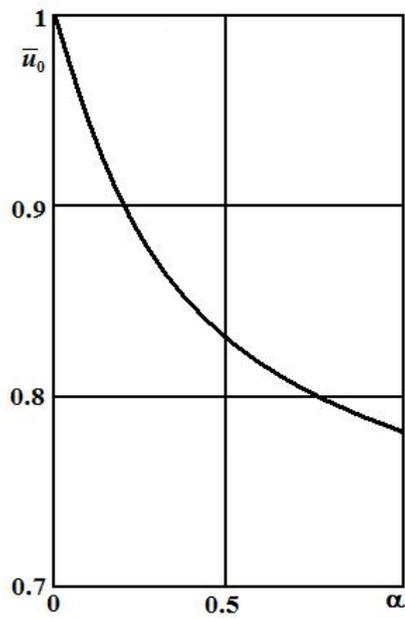


Рисунок 1.2 - Кривая зависимости критической скорости от угла раскрытия границ течения

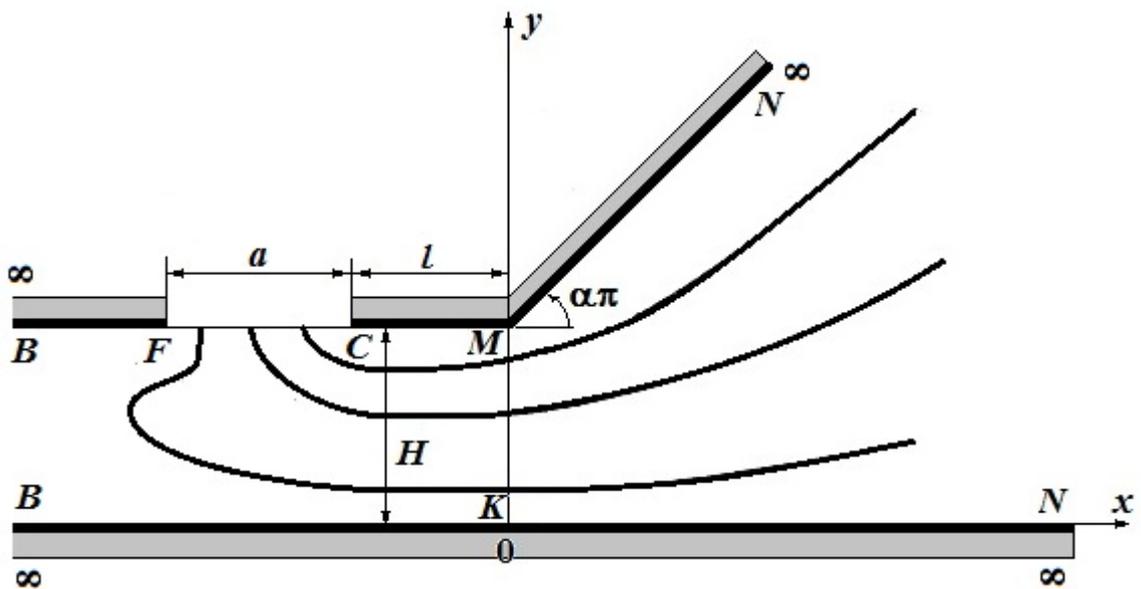


Рисунок 1.3 – Щелевидный канал со всасывающей щелью на стенке

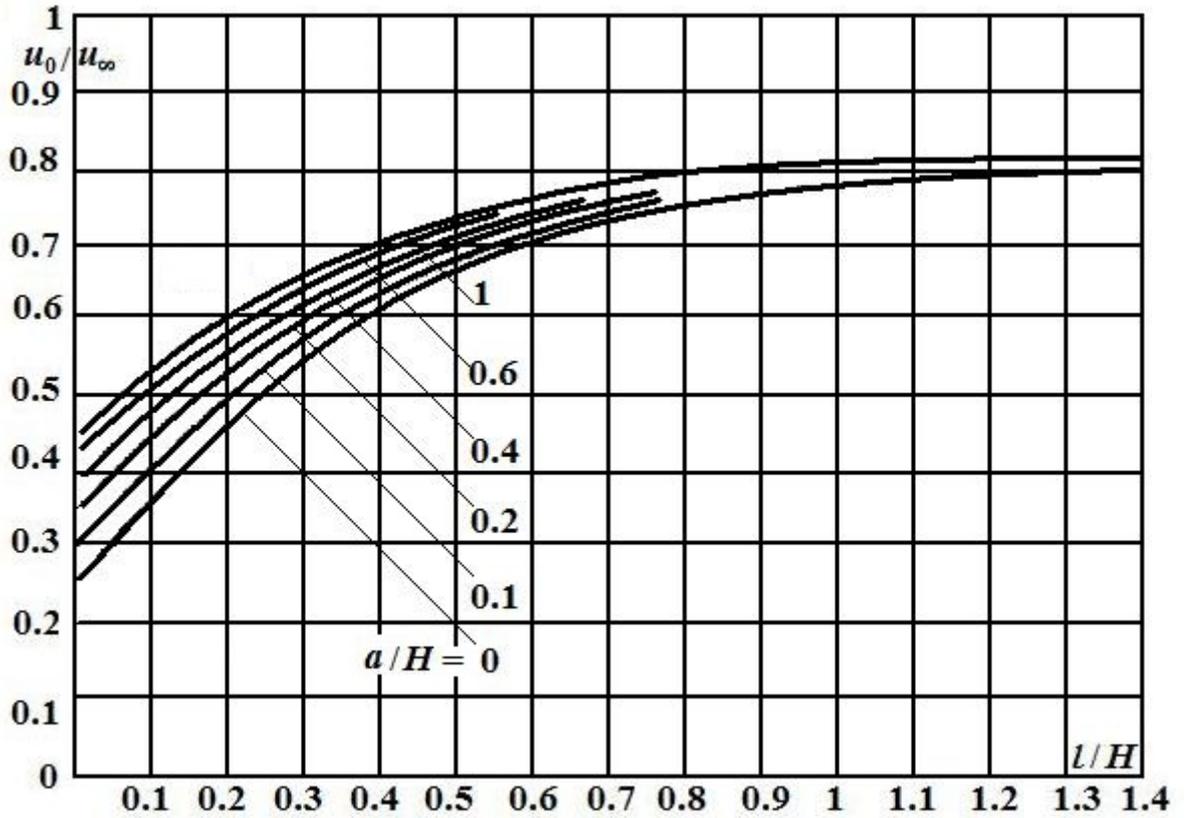


Рисунок 1.4 - Изменение величины скорости воздуха в критической точке K при удалении l щелевого всасывающего отверстия

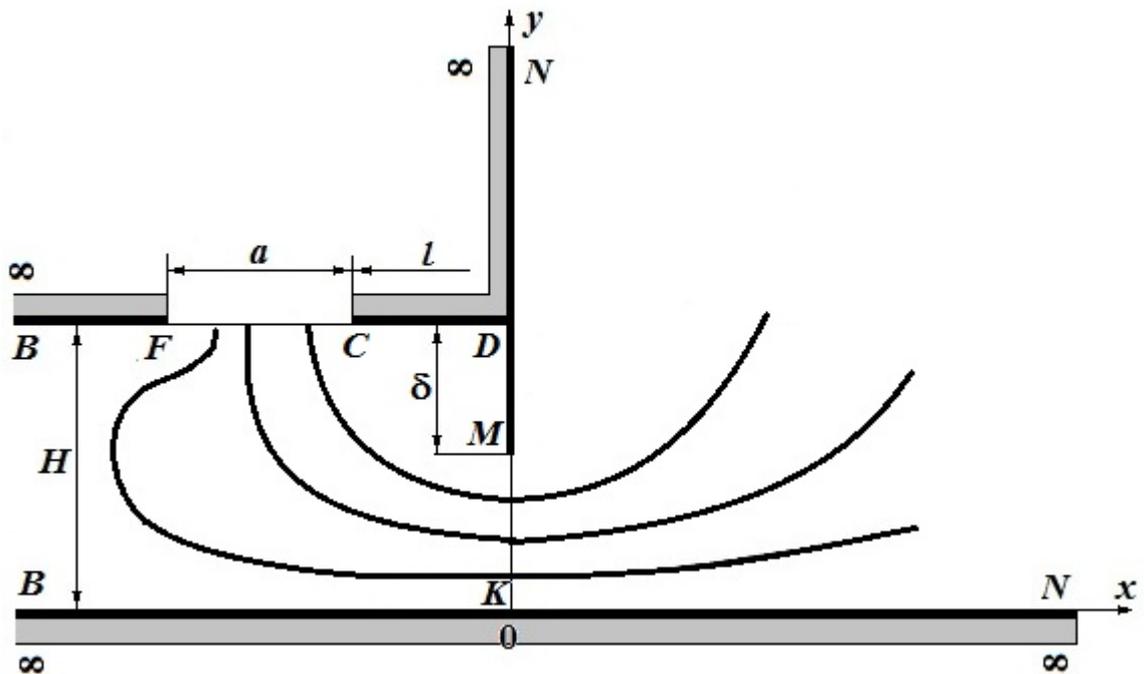


Рисунок 1.5 – Схема течения вблизи всасывающего щелевидного канала с перекрытым входным сечением

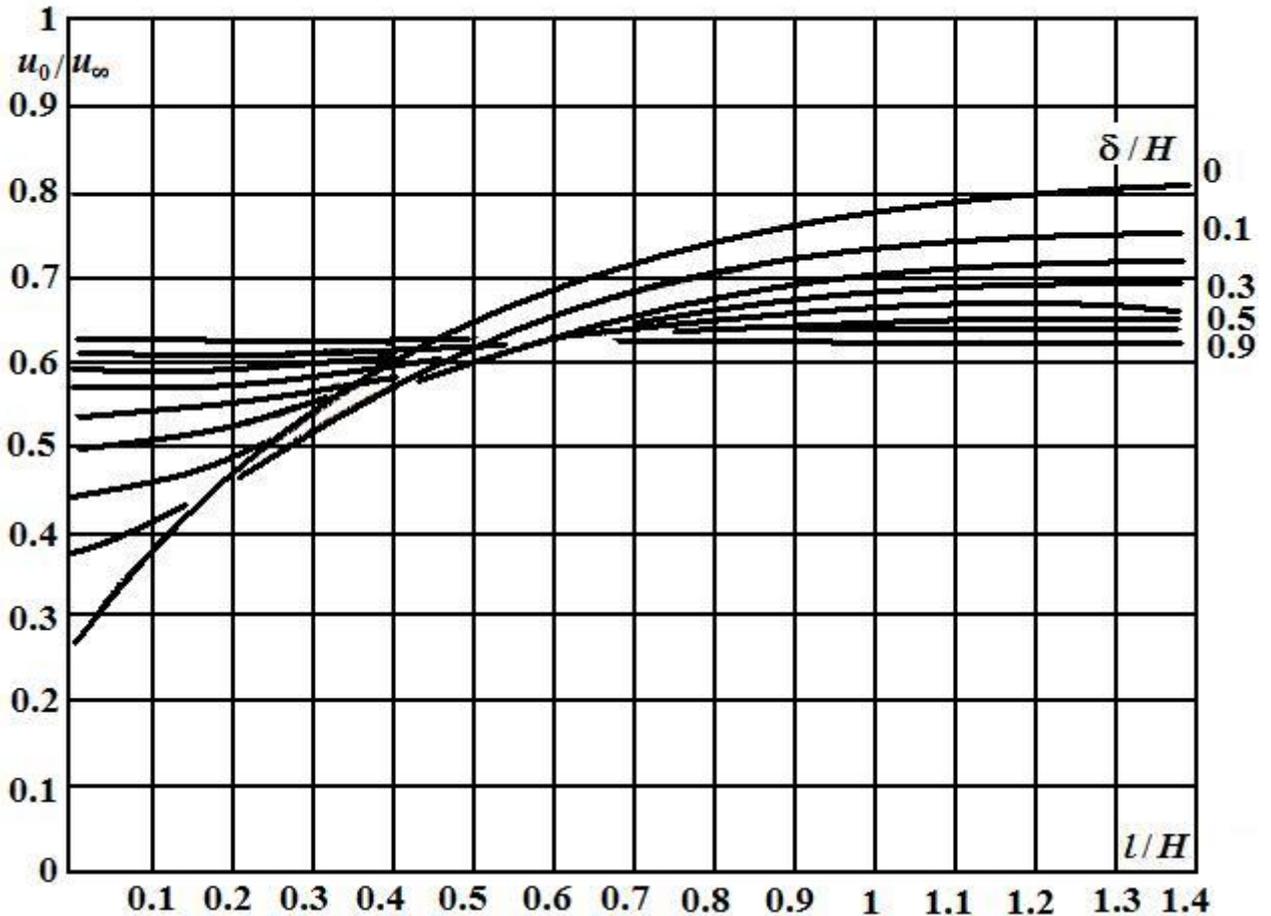


Рисунок 1.6 – Кривые изменения критической скорости воздуха от глубины размещения стока в канале, оснащённого вертикальным щитом

1.2. Методы расчёта отрывных течений

За последнее время опубликовано множество работ, посвящённых исследованию отрыва потока при входе во всасывающие отверстия.

При помощи методов конформных отображений и расчета струйных течений идеальной несжимаемой жидкости [26] или потенциальных течений с неизвестными заранее границами [47], определены характеристики течений вблизи щелевидных всасывающих устройств, раструбов [48-54] и бортовых отсосов [55-58]. Расчёт отсосов-раструбов (стоков-раструбов) производился для определения размеров вихревых областей при входе в канал. Наличие набегающего потока не учитывалось.

В работе [59], при расчёте щелевидного отсоса в неограниченном пространстве, была учтена скорость набегающего потока (рисунок 1.7).

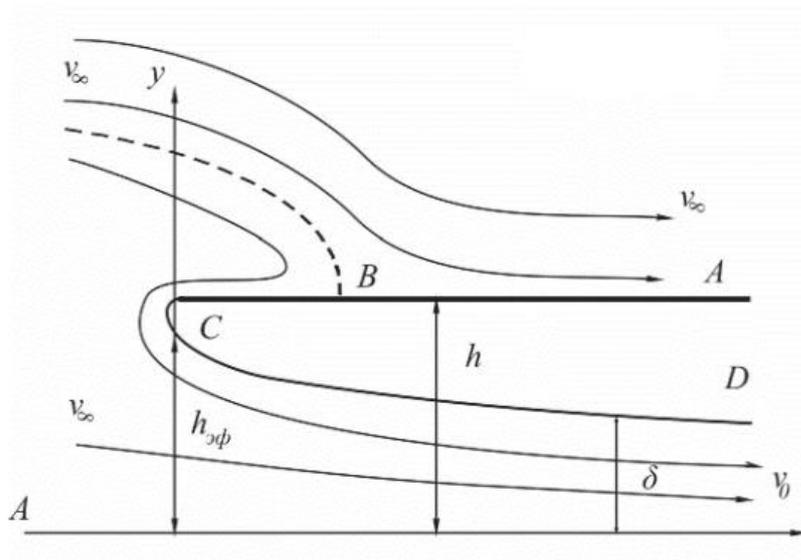


Рисунок 1.7 - Схема набегающего потока на щелевидный всасывающий канал

Построены свободные линии тока (рисунок 1.8) при разных отношениях скорости набегающего потока к скорости всасывания $\sigma = v_\infty / v_0$ в диапазоне от 0 до 0,99.

Была построена кривая зависимости (рисунок 1.9) ширины эффективного всасывания от величины σ . Предложена формула для построения этой кривой:

$$\bar{h}_{\text{эф}} = -0.33353\sigma^4 + 1.21213\sigma^3 - 1.65053\sigma^2 + 0.99937\sigma + 0.77262.$$

Другое направление потока не рассматривалось.

Эта же задача решена в работе [60] с учётом вязкости (рисунок 1.10). Отметим значительное увеличение зоны отрыва потока при численном решении задачи в среде Ansys Fluent.

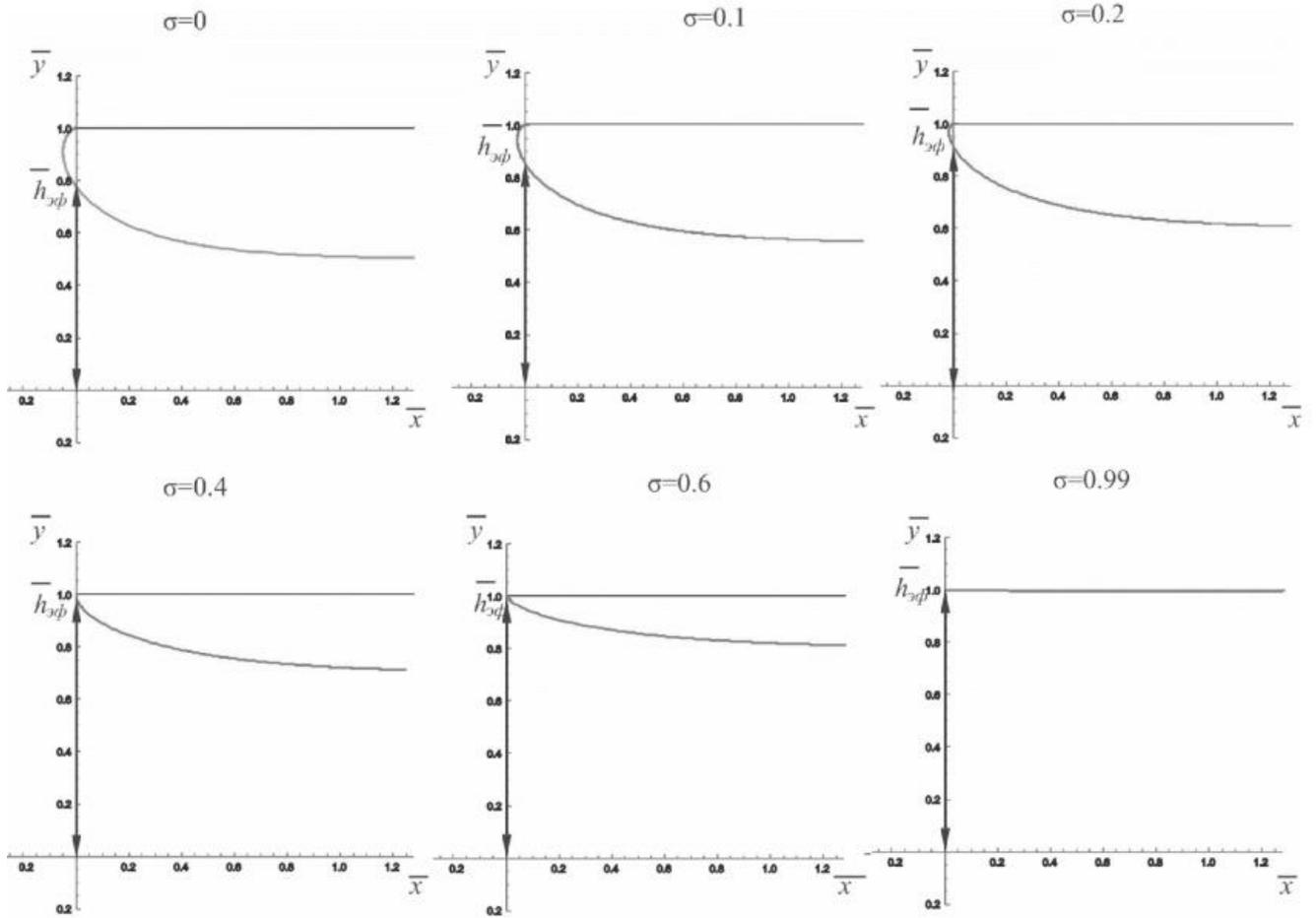


Рисунок 1.8 – Форма свободной линии тока при разных величинах σ

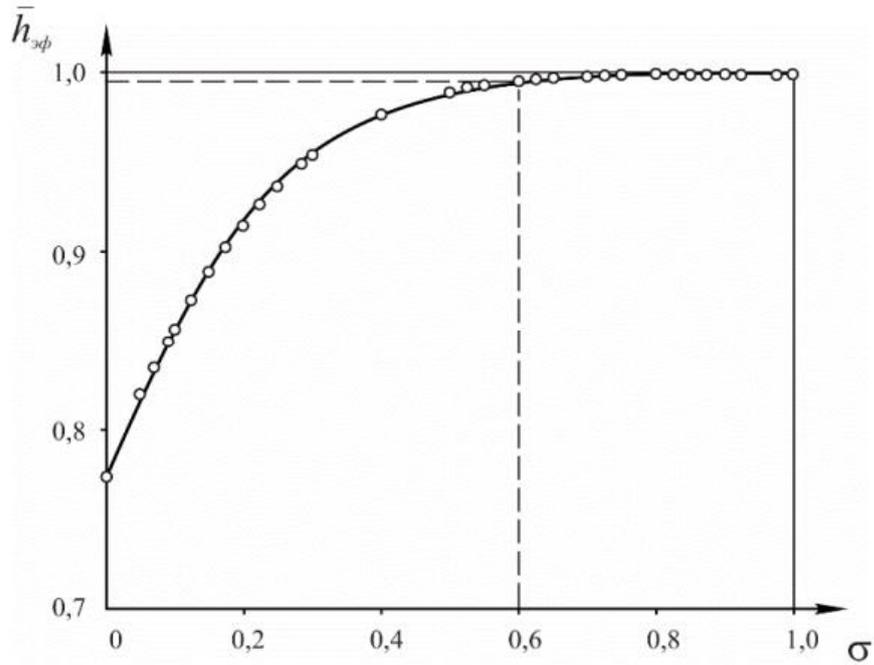


Рисунок 1.9 – Зависимость эффективной ширины всасывания от $\sigma = v_{\infty} / v_0$

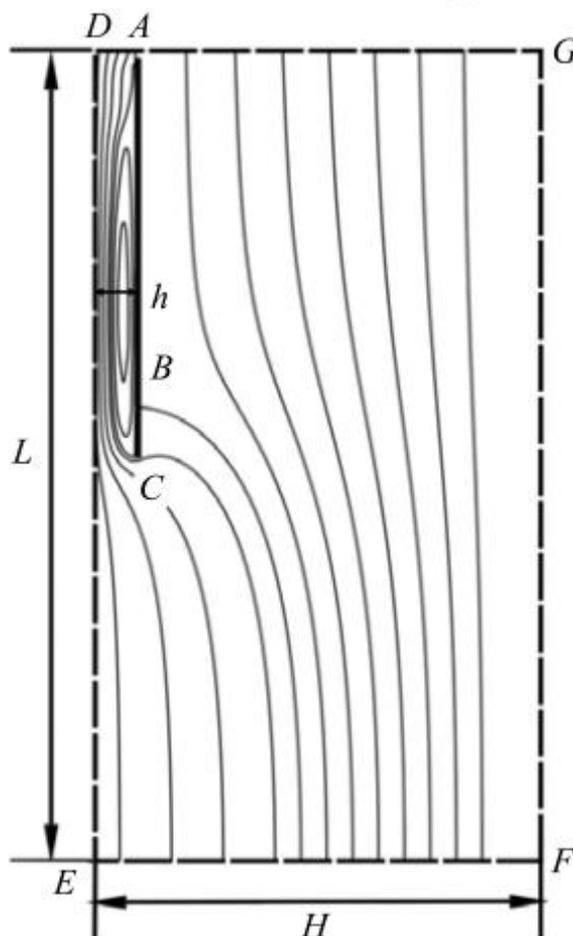


Рисунок 1.10 – Набегание потока на щелевидный всасывающий канал

Произведено сравнение зависимостей эффективной ширины всасывания от безразмерной скорости внешнего потока (рисунок 1.11). Расчёт воздушных потоков у круглых отсосов-раструбов, в том числе и в условиях набегающего потока, не производился.

В работах [61-63] с использованием программы Ansys Fluent и $k-\epsilon$ модели турбулентности определяются к.м.с. при входе в щелевидный канал воздуховода и определены размеры вихревой области, образующейся при отрыве потока.

В работах [64-70] используются различные численные методы для расчета вентиляционных и аспирационных течений. В частности, рассмотрены проблемы дискретизации, постановки граничных условий и неустойчивости течений.

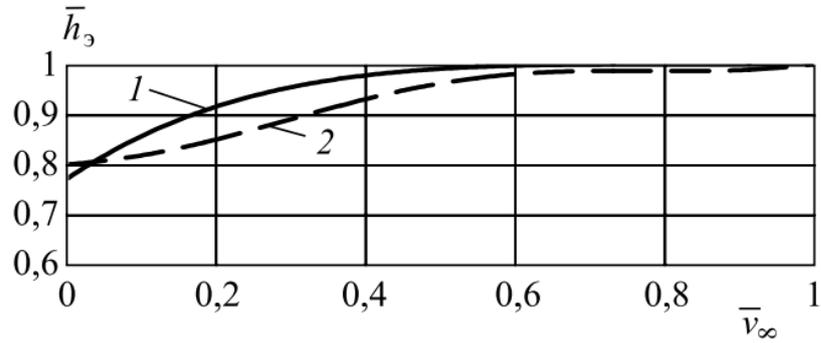


Рисунок 1.11.- Зависимость безразмерной ширины эффективного всасывания от величины $\sigma = \bar{v}_\infty = v_\infty / v_0$: 1 – аналитическое решение; 2 – численное решение

Расчёт отсоса-раструба с использованием численного метода сингулярных интегральных уравнений [71,72], называемый в инженерной практике методом дискретных вихрей произведён в работах [73-75]. Использовалась нестационарная постановка задачи, вычислительный алгоритм которой описан далее в главе 2. С острых кромок раструба происходил срыв свободных вихрей, с течением времени вихревая область течения увеличивалась (рисунок 1.12).

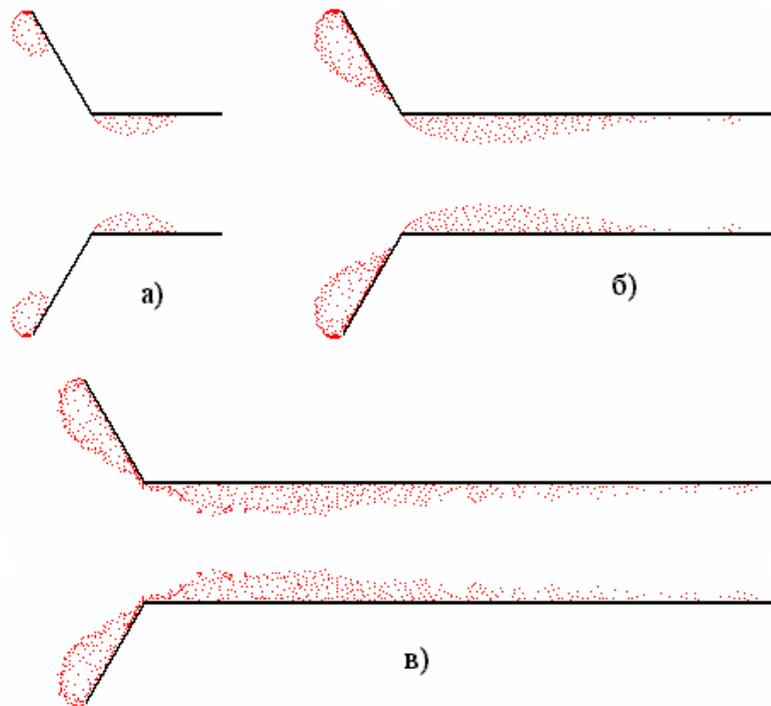


Рисунок 1.12 - Картина отрыва потока на входе во всасывающий отсос-раструб в разные моменты времени

Затем течение стабилизировалось (рисунок 1.13), после чего определялись размеры вихревых областей в заданный момент времени.

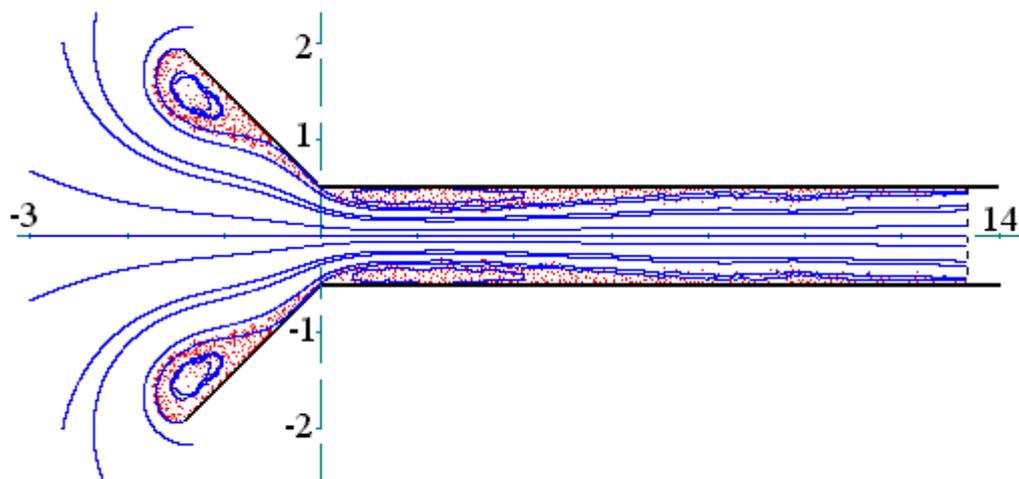


Рисунок 1.13 – Границы вихревой области в щелевом отсосе - раструбе

Был рассмотрен и круглый отсос-раструб (рисунок 1.14).

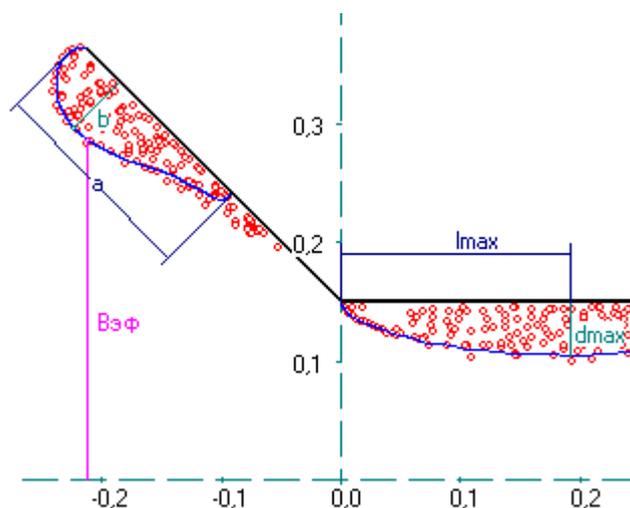


Рисунок 1.14. - Очертание вихревой области на входе в щелевой отсос - раструб

Картины течения для щелевидного отсоса-раструба и вблизи щелевидного отсоса [76], полученным численным путём, сравнивались с экспериментами [77] с луковичной шелухой (рисунки 1.15-1.16).

Однако, наблюдаются не только продольные и поперечные пульсации скоростей воздуха, особенно в вихревых областях, но и пульсации размеров

вихревых областей. Поэтому, представляет интерес определить усреднённые значения геометрических размеров вихревых областей. Влияние движения среды здесь так же не учитывалось, поведение пылевых частиц в спектре действия отсосов-раструбов не исследовалось.

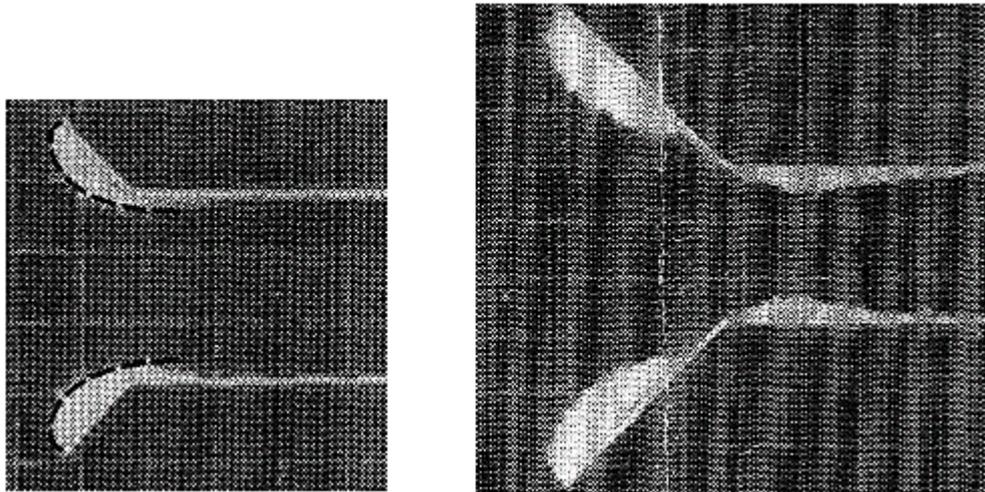
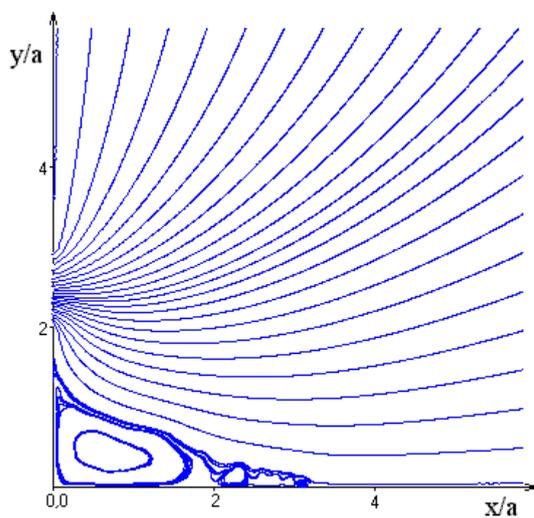
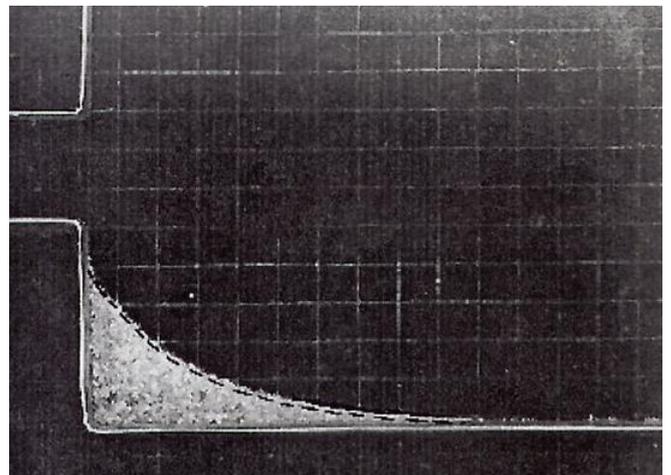


Рисунок 1.15 - Фотографии границ отрывной области в щелевом отсосе-раструбе



а)



б)

Рисунок 1.16 – Численная (а) и экспериментальная (б) картины течения вблизи бокового отсоса

Определение границ вихревых областей необходимо для правильного профилирования входных проёмов местных отсосов, что приведёт к улучшению их аэродинамических и акустических свойств. Снижение к.м.с. входа в отсос позволит снизить затраты на эксплуатацию систем местной вытяжной вентиляции.

Существует обратная задача [4,6]: повысить аэродинамическое сопротивление входа во всасывающий канала для снижения расхода воздуха, поступающего в него. Это актуально для снижения расхода воздушного потока через неплотности или несанкционированные проёмы в системах промышленной вентиляции. Отметим ряд работ [78-83], в которых приведены исследования влияния непроницаемых экранов (профилей, тонких козырьков), расположенных в спектре действия всасывающего канала, на к.м.с. входа в это канал.

Вначале были проведены исследования при помощи теории функций комплексного переменного и метода Н.Е. Жуковского [6, 78-81].

Была рассмотрена задача об отрыве потока на входе в щелевой канал с выступом (рисунок 1.17), которая также решалась и экспериментально.

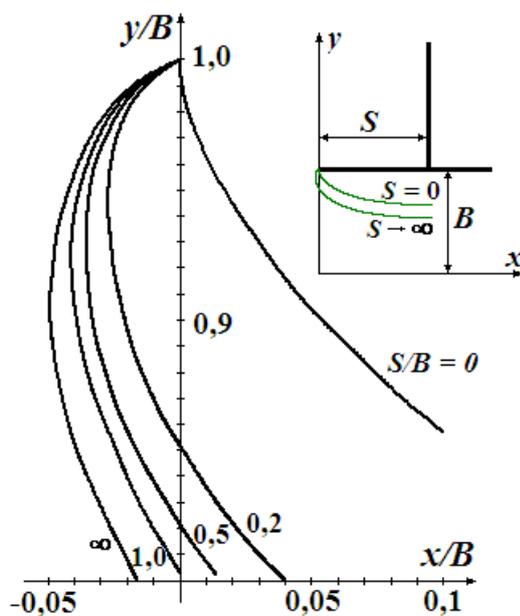


Рисунок 1.17 – Кривые отрыва воздушного потока
вблизи вытяжного отверстия с выступом в неограниченном пространстве

Было получено удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных.

Рассмотрены задачи об экранировании щелевидного всасывающего канала полубесконечными экранами: тонкого без выступа (рисунок 1.18); с выступом, но непроницаемым глухим экраном (рисунок 1.19); и с наличием обоих экранов и выступом (рисунок 1.20).

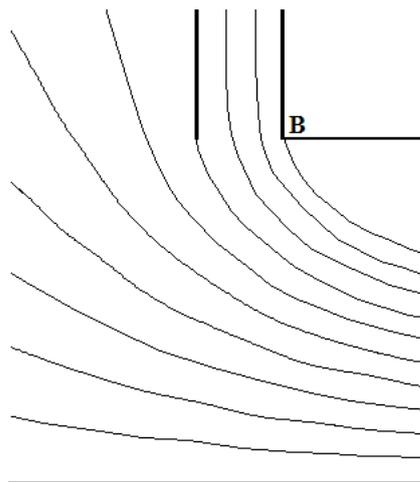


Рисунок 1.18 – Линии тока вблизи всасывающего щелевидного канала с вертикальным экраном

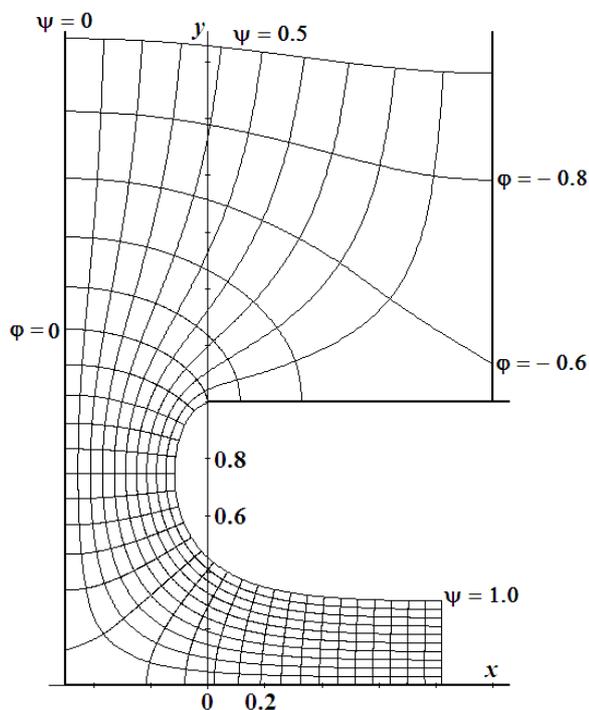


Рисунок 1.19 – Линии тока и эквипотенциали отрывного течения на входе в выступающий канал с непроницаемым экраном

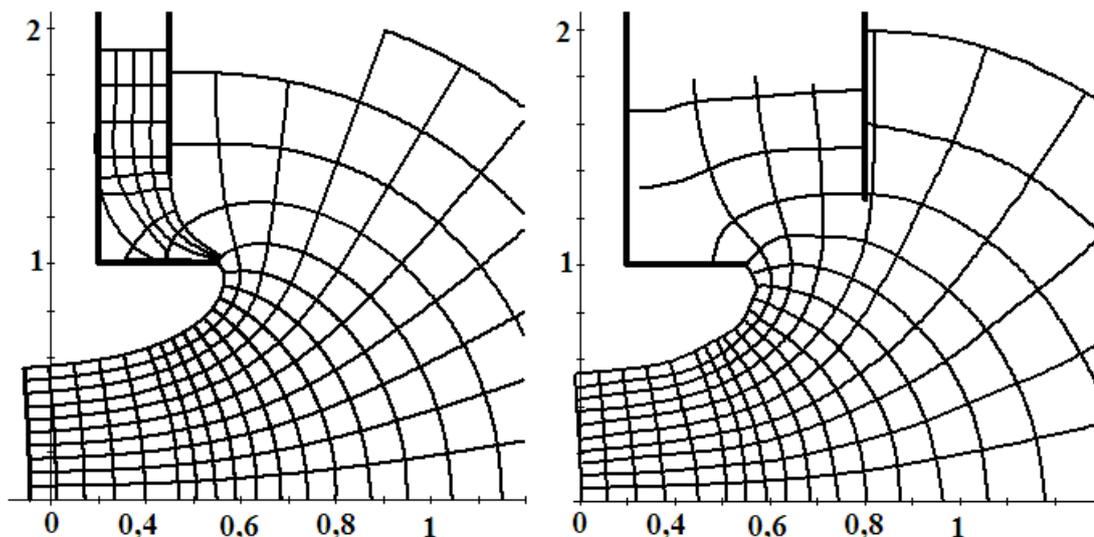


Рисунок 1.20 – Линии тока и эквипотенциали на входе в щелевидный всасывающий канал с выступом и при разных положениях полубесконечного вертикального экрана

Методами теории функций комплексного переменного и Н.Е.Жуковского не представлялась возможность учесть конечность механических экранов, а также произвести расчёт для круглых каналов. Поэтому, с использованием дискретных вихрей была разработана вычислительная процедура и компьютерная программа для моделирования воздушных течений во всасывающих каналах, в спектре действия, которых находились экраны (профили) конечной длины [6, 81-83]. Заметим, что использование нестационарных дискретных вихрей не дали возможность построить свободную поверхность тока, поскольку пульсации скоростей влияли больше на её расположение, чем сами экраны [22,84]. Поэтому, были использованы стационарные дискретные вихри [6, 81-83], что дало возможность построить свободную линию тока, найти коэффициент сжатия струи и определить зависимость к.м.с. от расположения и длины профилей [25,85,86].

Были рассмотрены не только прямолинейные профили (рисунок 1.21), но и с выступом (рисунок 1.22). Предложена формула связи к.м.с. и коэффициента сжатия струи [25]:

$$\zeta = \left(1 - \frac{1}{(3.115\delta^2 - 3.788\delta + 1.834)^2} \right)^2 \quad (1.1)$$

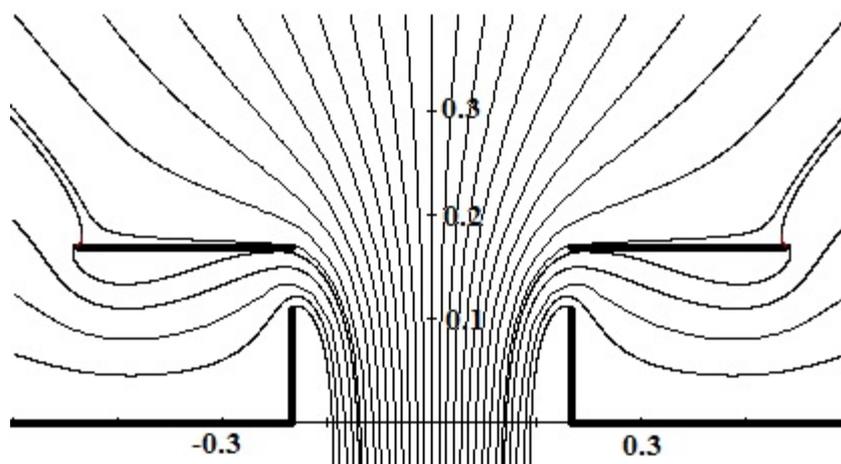


Рисунок 1.21. - Линии тока при входе в круглую всасывающую трубу с кольцевым экраном

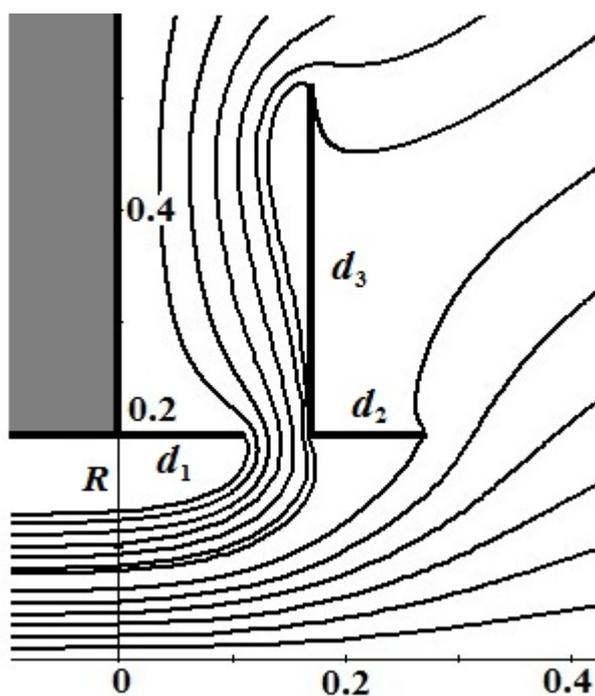


Рисунок 1.22 - Линии тока при входе в круглую всасывающую трубу, в спектре действия которой находится круглый тонкий экран с выступом

Сравнение величин к.м.с., полученных расчётным путём и экспериментом продемонстрировали хорошее согласование (рисунок 1.23).

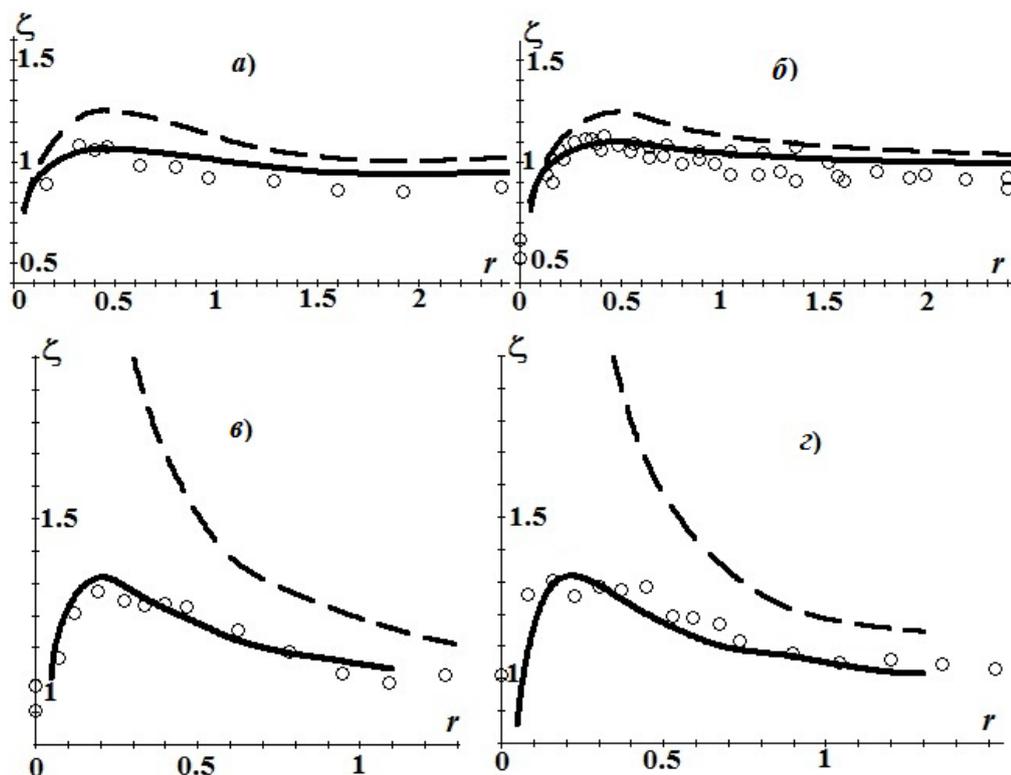


Рисунок 1.23 - Сравнение численных расчетов и экспериментальных данных для к.м.с. ζ при изменении расстояния экрана до всасывающего проёма (пунктирная линия – расчёт по формуле проф. И.Е. Идельчика ($\zeta = (1 - 1/\delta_\infty^2)^2$) [87]; сплошная линия – расчёт по формуле (1.1) ; кружочки – экспериментальные данные в обозначениях рисунка 22: *a* - $d_3/R = 1,55$; $d_1/R = 0,5$; *б* - $d_3/R = 1,55$; $d_1/R = 0,55$; *в* - $d_3/R = 1,55$; $d_2/R = 0,59$; $d_1/R = 0,5$; *г* - $d_3/R = 1,55$; $d_2/R = 0,96$; $d_1/R = 0,5$

Все эти исследования с практической стороны были направлены на снижение расхода воздуха, поступающего во всасывающий канал. Как показали эксперименты максимального снижения этого расхода, на величину 16%, можно достичь при $d_3/R = 1$, $d_2/R = 0,5$, $d_1/R = 0,5$ и при удалении $\bar{r} = 0,5 - 0,9$ калибров от первого козырька (кривая 3 рисунок 1.24). Кривые 1-5 построены при других возможных размерах уголка. Эксперименты с рядом профилей значительного снижения расхода не дали. Максимум, который

достигнут – это 17%, т.е. практически совпадает с описанным уголковым профилем.

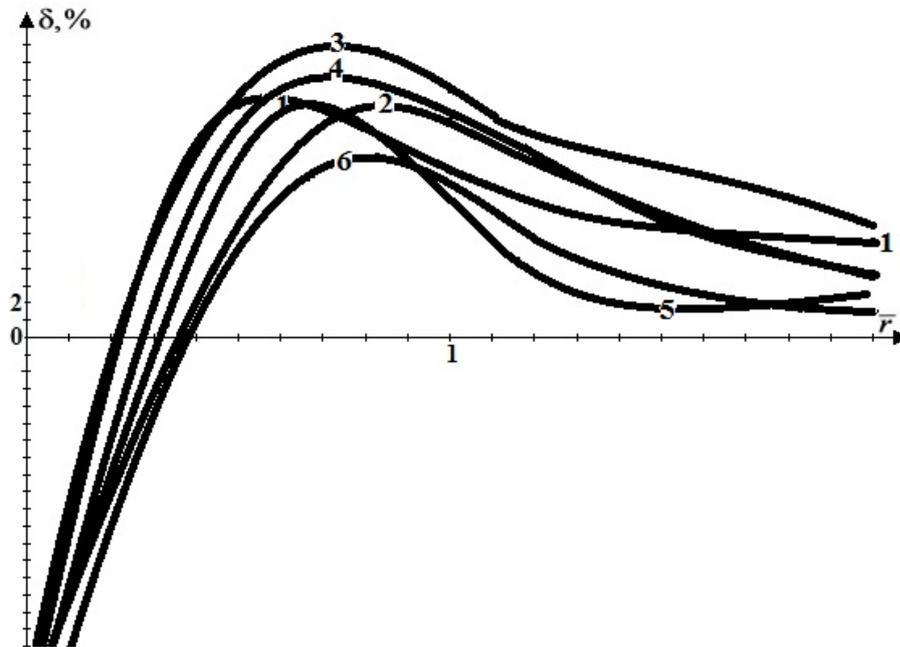


Рисунок 1.24 – Изменение величины изменения расхода от удаления уголкового экрана от выступа всасывающей щели при $d_3/R=1$: 1 - $d_2/R=1/6$; 2 - $d_2/R=1/3$; 3 - $d_2/R=1/2$; 4 - $d_2/R=2/3$; 5 - $d_2/R=5/6$; 6 - $d_2/R=1$

Попытка перейти к расчёту пространственных течений была произведена в работах [88-90], где рассмотрен отрыв потока на входе в квадратный и многоугольный всасывающие каналы, а также экранированный круглый канал.

К качестве дискретных вихрей использовались многоугольные рамки (рисунок 1.25).

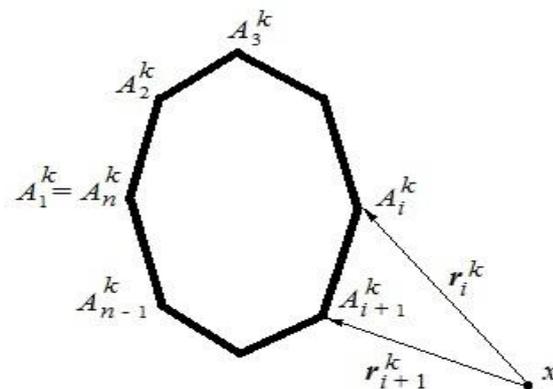


Рисунок 1.25 - Расчётная точка x k -й вихревой n -угольной рамки

Расчётные точки располагались как показано на рисунке 1.26.

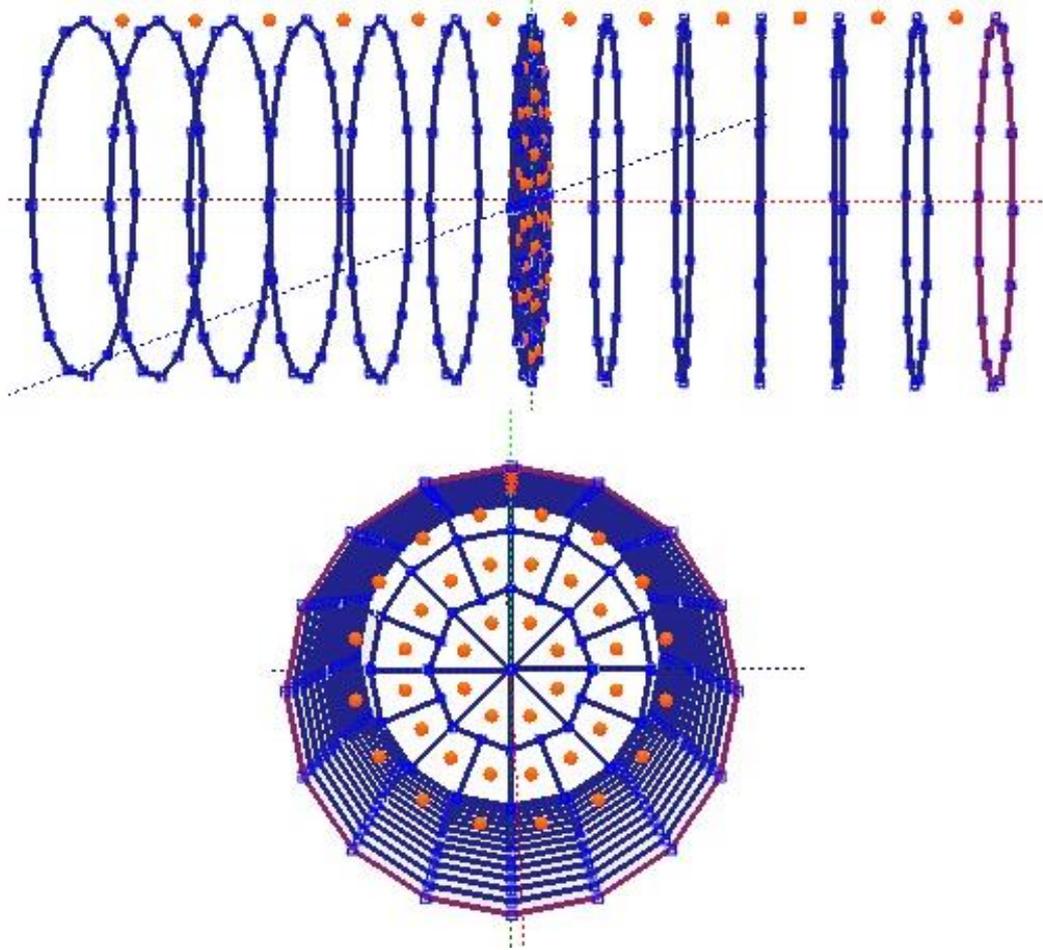


Рисунок 1.26 – Дискретизация многоугольного всасывающего канала

Был произведён расчёт отрыва потока для многоугольного канала (рисунок 1.27).

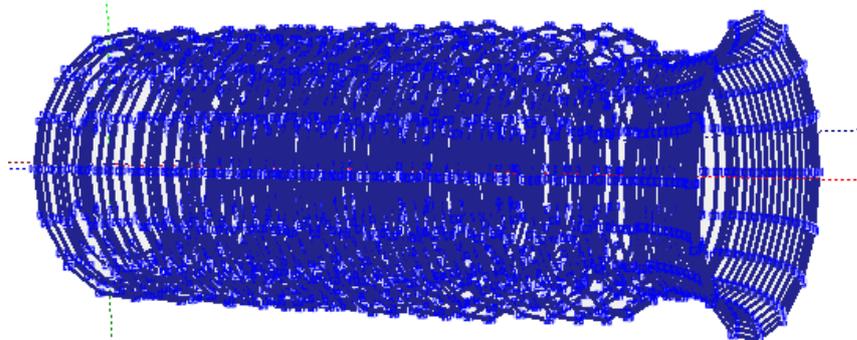


Рисунок 1.27- Свободная вихревая пелена внутри трубы

Разработанная компьютерная программа позволяла и обратить течение, т.е. исследовать приточную турбулентную струю (рисунок 1.28).

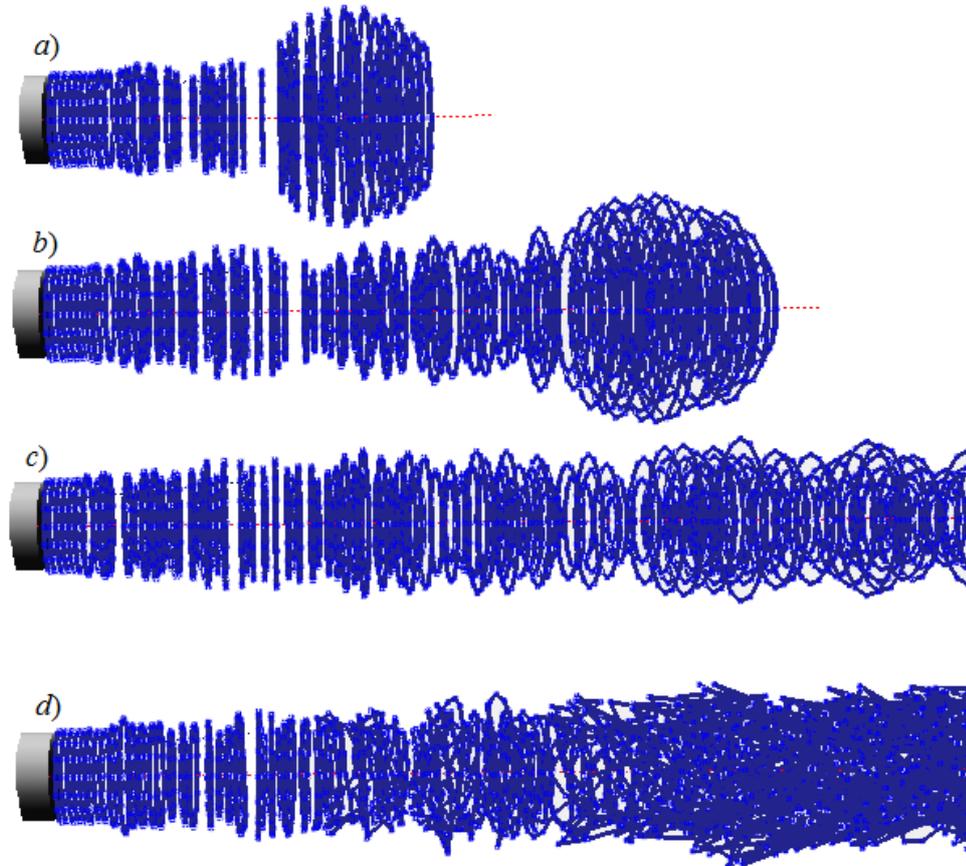


Рисунок 1.28 - Структура течения на выходе из 16-угольного канала в разные моменты времени

С помощью этой программы был исследован отрыв потока на входе в квадратный всасывающий канал. Дискретная модель для этого случая представлена на рисунке 1.29.

В результате обработки вычислительных экспериментов была предложена формула для определения отрывной поверхности тока в системе координат XYZ (рисунок 1.30):

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

Сечение свободной поверхности тока имеет квадратную форму. Она нарушается в случае приближения к её углам (рисунок 1.31).

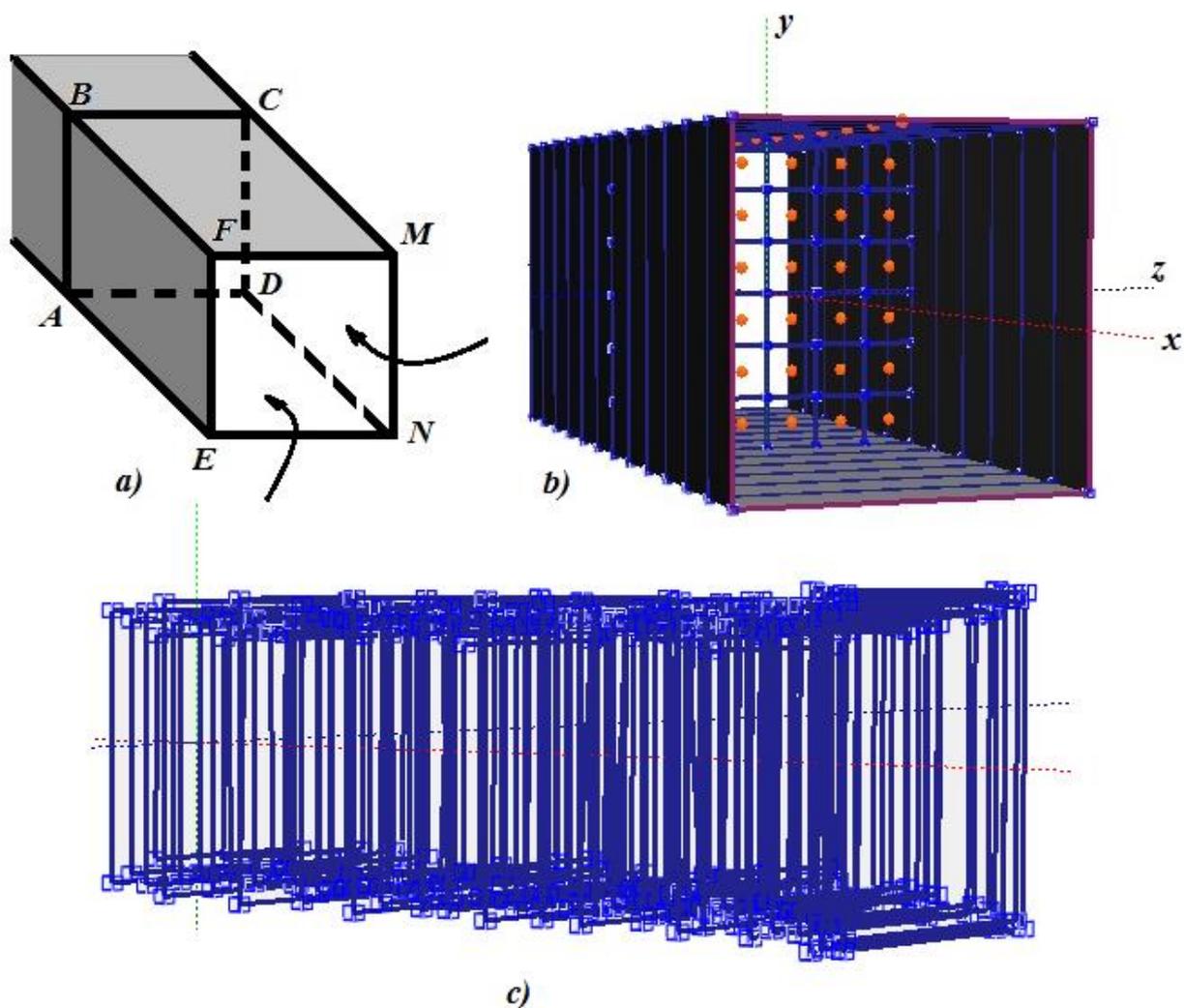


Рисунок 1.29 - Квадратный патрубок: *a)* схема; *b)* модель; *c)* свободная вихревая пелена

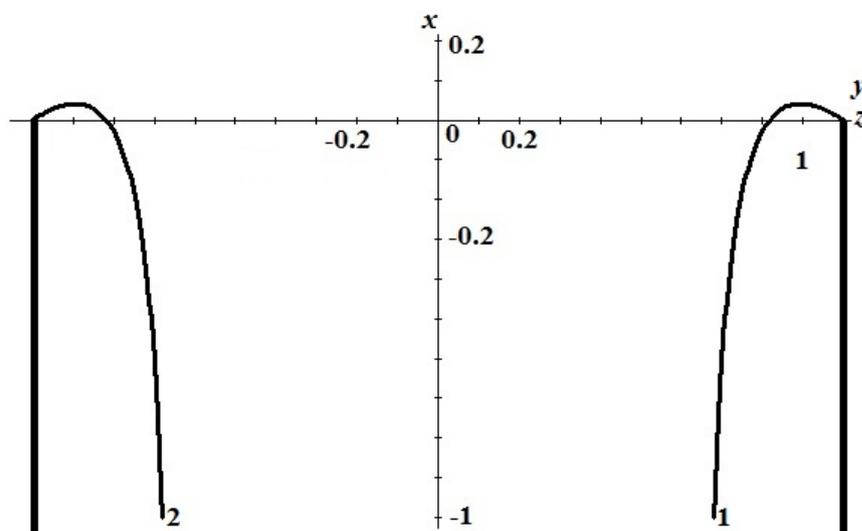


Рисунок 1.30 – Свободная поверхность тока

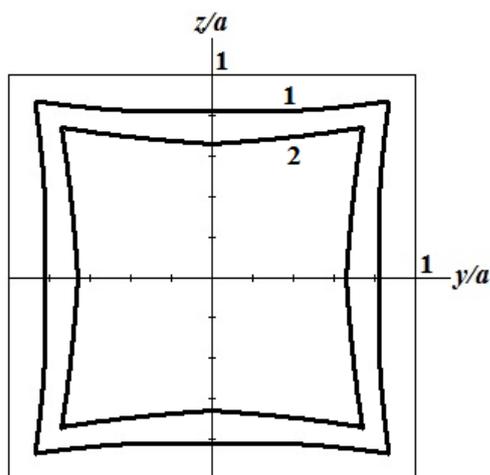


Рисунок 1.31 - Граница эффективного всасывания: кривая 1 - на входе в трубу;
2 - в сечении на расстоянии ≈ 0.8 стороны квадратного входа в трубу

Здесь наблюдается пульсация скорости, а значит и свободной поверхности тока. Расчёт производится значительно дольше, чем для осесимметричной постановки задачи.

Использование метода дискретных вихрей в работе [91] позволило не только исследовать течения вблизи отсоса, но и описать циркуляционные течения в помещении при поступлении воздушной среды из окон по направляющим и отсосе в верхней части сооружения.

В выше перечисленных работах поведение пылевых частиц вблизи отсосов открытого типа не изучалось. В механике аэрозолей, в частности, при решении задач об аспирации аэрозолей в пробоотборники, этот вопрос является главным. В России решением этих задач занимается школа проф. Зарипова Ш.Х. [27, 28, 96]. Были решены задачи не только в плоском приближении, осесимметричном, но и в пространственном, в том числе при наличии сносящего потока воздуха (рисунок 1.32). Течения вблизи стоков-раструбов не рассматривались.

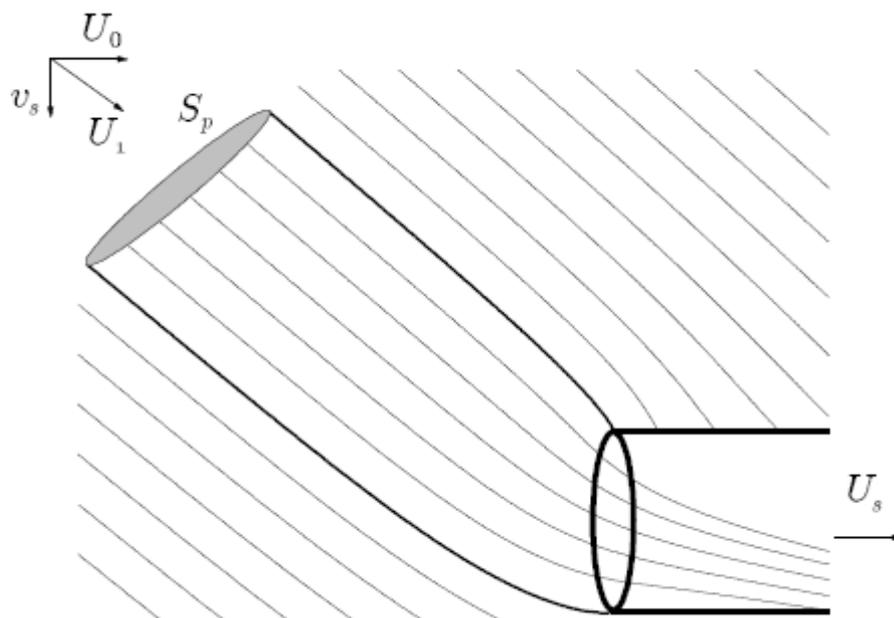


Рисунок 1.32 – Траектории пылевых частиц в сносящем низкоскоростном потоке

Эти задачи напрямую не связаны с предметной областью вентиляции, но представляют интерес применяемые методы и возможность сравнения результатов расчетов, по разработанным в диссертационной работе методам с вышеуказанными. Такое сравнение производится в четвертой главе и работе [97]. В работах [98,99] и главе 4 рассматривалось также течение вблизи круглой тонкостенной трубы, но сравнения производились с течением вблизи щелевого патрубка [59,60]. В этой же главе и статьях [100,101] приведены результаты исследований по поведению пылевых частиц вблизи отсосов-раструбов в условиях набегающего потока. Ранее такие исследования не проводились. Определение границ вихревых областей на входе в отсосы – раструбы в неограниченном пространстве и над непроницаемой плоскостью при покоящейся среде были рассмотрены в третьей главе и статьях [102-106], что также является новым. Попытка усреднения характеристик отрывной области на входе в круглые отсосы-раструбы в случае нестационарной постановки задачи произведена в статье [107].

Математически задача состояла в решении уравнения Лапласа для потенциала φ : $\Delta\varphi=0$, при известных величинах скорости вдоль направления внешней нормали $\left.\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right|_S = v_n(x) - U_n$, где x – принадлежит границе S . Функция U_n учитывает поступление в рассматриваемый поток свободных вихрей.

Интегральный аналог этого уравнения имеет вид:

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

где $\omega(\xi)$, $\mu = const$ – плотности интенсивностей граничного (присоединенного) и свободного вихревых слоев по поверхностям S и σ ; ξ – точка границы S ; $G(x, \xi)$ – скорость в точке $x(x_1, x_2)$ вдоль единичного вектора $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$, индуцированная единичным вихрем, находящимся в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$.

В случае осесимметричной постановки задачи эта функция принимает следующий вид:

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} F(t), & b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}}, & b = 0, \end{cases} \quad (1.2)$$

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

$$A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1], \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}.$$

Граничный вихревой слой дискретизируется вихревыми кольцами с

интенсивностями $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$. Система уравнений для их определения в модельный момент времени $t = m\Delta t$, при условии безциркуляционного течения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) + \sum_{l=1}^2 \sum_{\tau=1}^m \gamma^{l\tau} = 0, \\ \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) G(x^p, \xi^k) + \sum_{l=1}^2 \sum_{\tau=1}^m G(x^p, \zeta^\tau)^{p\tau} \gamma^{l\tau} = v_n(x^p), \end{cases} \quad (1.3)$$

где $\gamma^{l\tau}$ - циркуляция вихря, сошедшего в поток с l -й острой кромки, расположенного в точке ζ^τ в модельный момент времени τ ; $G(x^p, \zeta^\tau)$ определялась по формуле (1.2), также как и $G(x^p, \xi^k)$. В начальный момент времени данная система уравнений имела следующий вид:

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

Скорость воздушного потока определялась из первого уравнения системы уравнений (1.3), здесь вместо контрольной (расчётной) точки задавалась внутренняя точка рассматриваемой области течения.

В результате проведения вычислительных экспериментов выявлено, что скорость подтекания воздуха к отсосу-раструбу имеет экстремумы, в зависимости от угла раскрытия раструба α (рисунок 1.33).

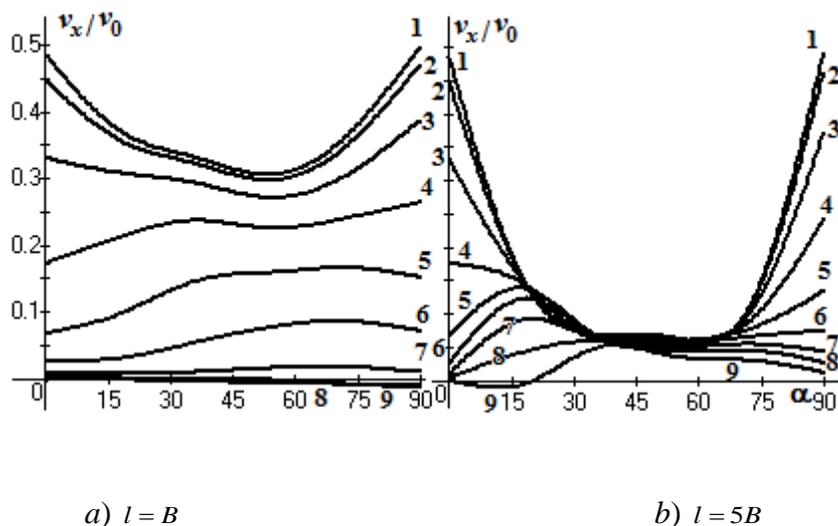


Рисунок 1.33. Зависимость составляющей скорости от угла α наклона отсоса-раструба в сечении $x = 2/3B$ при 1 - $y = 0$; 2 - $y = 1/3B$; 3 - $y = 2/3B$; 4 - $y = B$; 5 - $y = 4/3B$; 6 - $y = 5/3B$; 7 - $y = 2B$; 8 - $y = 7/3B$; 9 - $y = 7/3B$

В работе [108] исследовались равновесные линии для различных пылевых частиц при разных углах раскрытия раструба. На этих линиях скорости воздушного потока были равны скоростям витания пылевых частиц. Рассматривался только стоксовский режим обтекания пылевой частицы воздушным потоком. Поэтому скорость витания $v = \rho d_e^2 g / (18\mu\chi)$, ρ - плотность частицы пыли, d_e - её эквивалентный диаметр, χ - коэффициент формы частицы, g - ускорение свободного падения; μ - динамическая вязкость воздуха.

Из сравнения равновесных линий (рисунок 1.34) следует, что угол $\alpha = 90^\circ$ является предпочтительным для улавливания частиц, так как x/B принимают большие значения. Однако, есть исключения. Например, при $\alpha = 54^\circ$, $d = 20$ мкм, $y/B = 2$ (рисунок 1.34b) имеется точка, где сила тяжести уравновешивается силой сопротивления воздушного потока. При $\alpha = 54^\circ \div 72^\circ$, $d = 40$ мкм (рисунок 1.5 d) существует уже отрезок, где предпочтительнее отсос-раструб с углом $\alpha = 72^\circ$.

В работах [107, 108] не удалось полностью исключить влияние пульсаций скоростей. Усреднения времени по 20 расчётным моментам было не достаточно, увеличение этих моментов приводит к большим затратам по времени счёта.

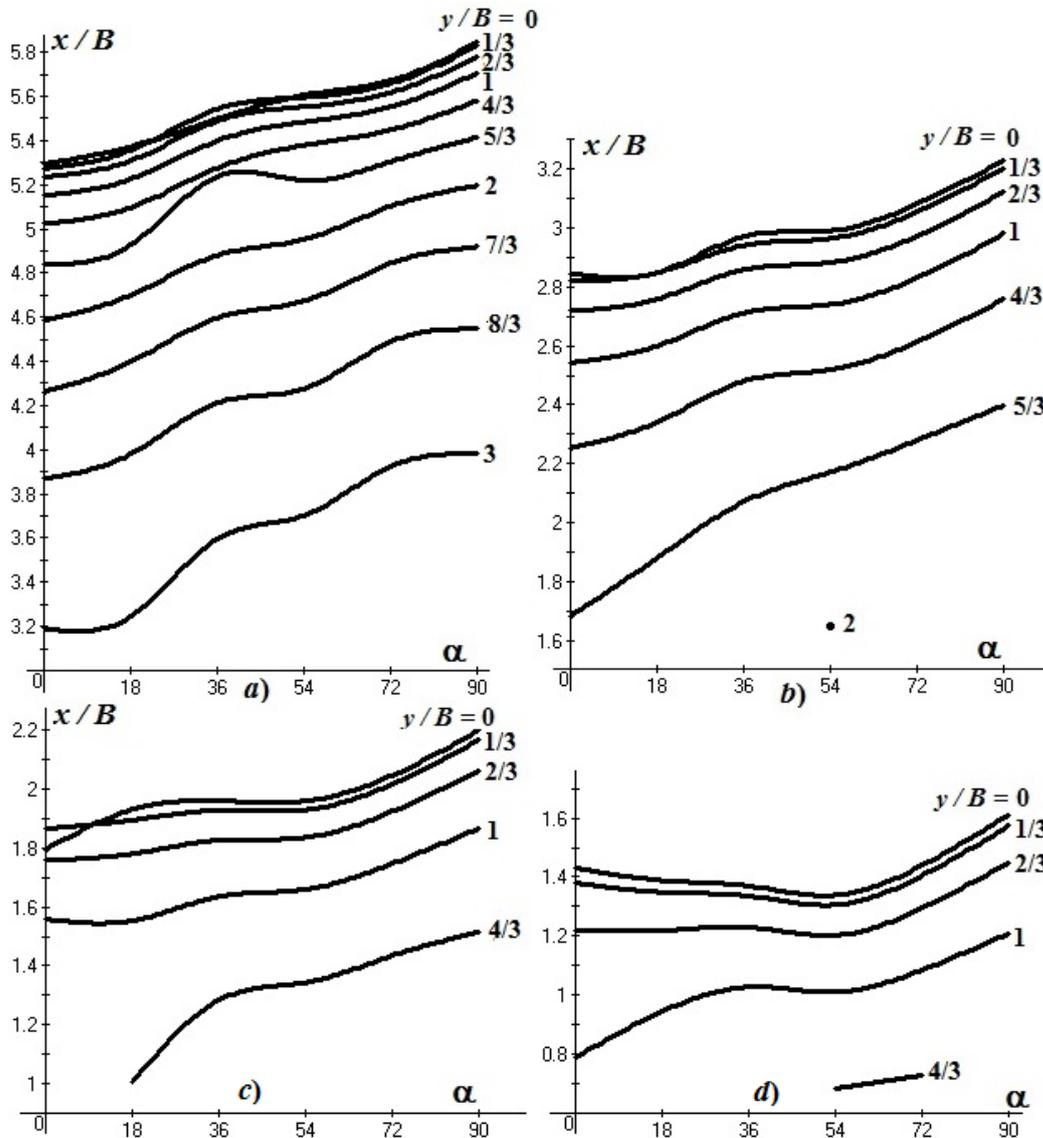


Рисунок 1.34 – Зависимость величин x/B при разных y/B и длине раструба $l/B=1$: а) $d = 10\text{мкм}$; б) $d = 20\text{мкм}$; в) $d = 30\text{мкм}$; д) $d = 40\text{мкм}$

Этим же методом рассматривалось воздушно-струйное экранирование отсоса-раструба (рисунок 1.35) рассмотрено в статье [109], где в отличие от статьи [110] был получен эффект от экранирования отсоса в неограниченном пространстве.

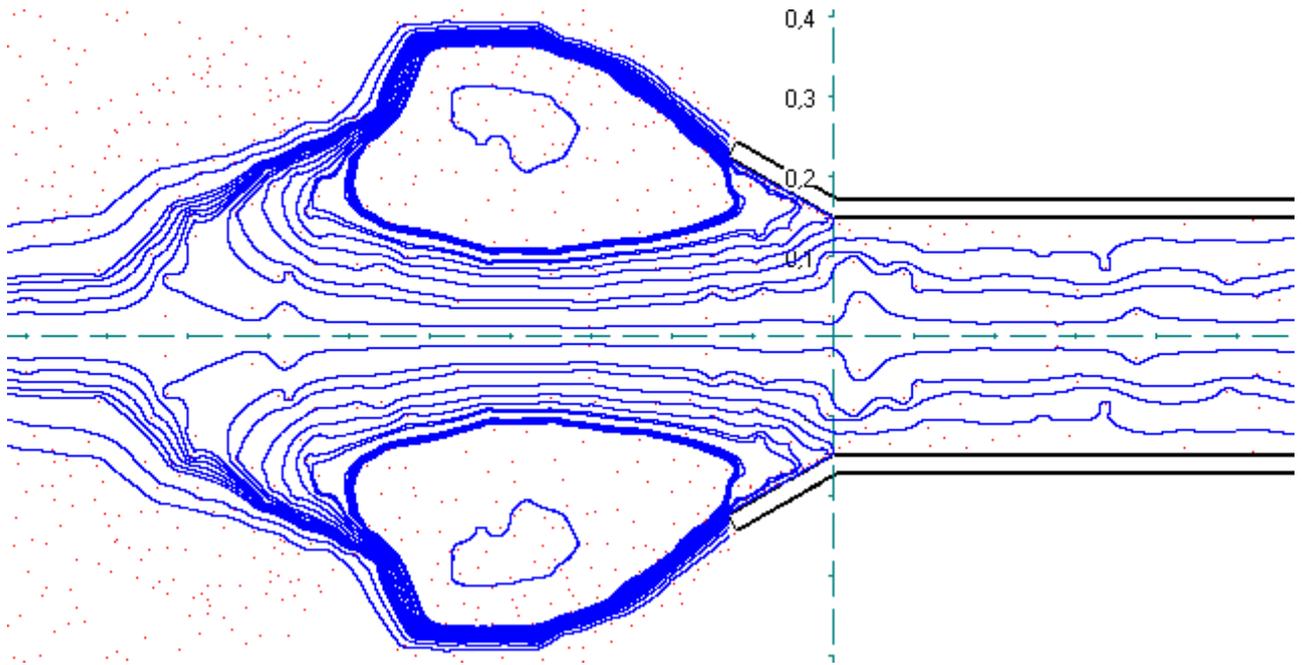


Рисунок 1.35 – Воздушно-струйное экранирование круглого отсоса-раструба кольцевой струёй, истекающей из торцов раструба

Из рисунка 1.36 следует, что зона действия всасывающего факела повышается в 5 - 50 раз в точке $S/B=5$, при определённом угле раскрытия α раструба и его длины. Здесь dln – отношение скоростей в данной точке при наличии экранирующей воздушной струи и без неё. Скорость воздушного потока в отсосе выбиралась с учётом равенства расхода отсасываемого воздуха сумме расходов отсасываемого воздуха и приточного воздуха, т.е.:

$$v_0^b = \frac{\pi r^2 v_0 + \pi ((r+h)^2 - r^2) v_p}{\pi r^2} = \frac{r^2 v_0 + h(2r+h)v_p}{r^2},$$

v_0^b - скорость воздуха в отсосе без экранирования; v_0 - скорость там же, но при наличии экранирования; v_p - скорость приточной экранирующей кольцевой струи; h - ширина кольца; r - радиус всасывающего сечения.

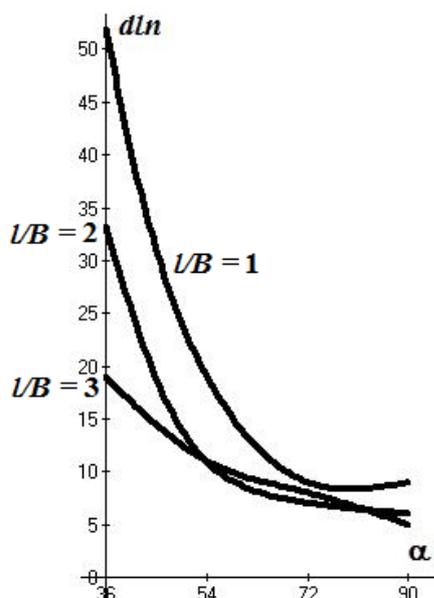


Рисунок 1.36 – Изменение дальности действия отсоса при $\alpha = 36^\circ - 90^\circ$ и удалении на 5 калибров и $v_p / v_0 = 10$

1.3. О критериях эффективности местных отсосов-раструбов

Существуют несколько подходов к определению эффективности отсосов-раструбов. Так, коэффициент (критерий) неравномерности всасывания, определяется путём деления скорости воздушного течения в центре сечения, проходящего через кромки раструба к величине средней скорости всасываемого потока $\eta = v_c / v_0$. Без раструба $\eta = 0,95 - 0,97$ [92]; при $\alpha = 60^\circ$ – $\eta = 1,03 \div 1,09$; при $\alpha = 90^\circ$ – $\eta = 1,65 \div 1,75$. Эксперименты проводились Т.А. Фиалковской [93] и В.В. Батуриным [7]. Измерялись величины скорости воздушного потока в области всасывания квадратных и прямоугольных раструбов с соотношением сторон 1:2, 1:3, 1:4 и углах между образующими $50^\circ - 90^\circ$ (угол α изображён на рисунке 1.37). Сведения о длинах раструба в данных источниках не приводились. Круглые отсосы-раструбы не рассматривались.

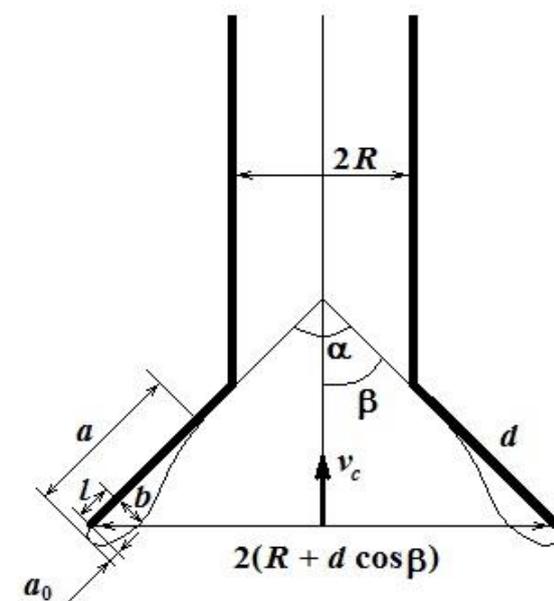


Рисунок 1.37. Местный отсос - раструб

По результатам исследований сделан вывод о большей эффективности раструба с углом $\alpha = 60^\circ$, поскольку скорость в центре v_c близка к средней v_0 во всасывающем. Размеры сечения раструба должны быть не меньше размеров источника конвективного потока воздуха.

Этот вывод об эффективном раструбе с углом раскрытия $\alpha = 60^\circ$ был изложен во множестве учебников и монографий, к примеру, в книге [94] указывается, что для эффективной работы раструба (зонта) полным сечением, угол раскрытия принимают не более $\alpha = 60^\circ$. В случае увеличения угла раскрытия действует в основном центральная часть раструба, а далее наблюдаются мёртвые зоны.

Существует иной подход. В монографии В.Н. Посохина [2] указано, что раструб следует выполнять с углом полураскрытия $\beta = \alpha / 2 = 60^\circ$, так как размер отрывной области при входе в раструб принимает минимальное значение, а «эффективный размер» раструба максимальную величину. Моделирование отрыва потока проводилось для щелевидных отсосов-раструбов при помощи

метода конформных отображений [48]. Здесь эффективней считался раструб с максимальной шириной эффективного всасывания.

Часто предлагалось считать более эффективным отсос-раструб с большей скоростью всасываемого воздуха на его оси. В работе [4] показано, что данная скорость имеет максимальную величину при $\beta = \alpha / 2 = 90^\circ$. В данных исследованиях использовались метод конформных отображений, метод Н.Е. Жуковского и метод дискретных вихрей (МДВ). Были рассмотрены щелевидные, и круглые отсосы-раструбы.

Важной характеристикой отсоса-раструба является его аэродинамическое сопротивление – коэффициент местного сопротивления. Из графиков [87] следует, что наименьший к.м.с. имеет отсос-раструб с углами $\alpha = 50^\circ - 100^\circ$ при разных длинах раструба. Чем меньше эта длина, тем ближе закон изменения к.м.с. от угла α приближается к линейному.

Местные отсосы применяются не только для улавливания нагретых газообразных потоков, но и для улавливания пылевых выбросов: сварочных аэрозолей, абразивно-металлической и древесной пыли, песка, цемента и др. в данном исследовании предложен ещё один критерий эффективности: коэффициент улавливания, равный отношению объема аспирируемой области течения отсоса-раструба к этому же объёму, но без раструба. Более подробно об этом коэффициенте изложено в следующей главе.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

В результате аналитического обзора решения задач о пылевоздушных течениях в спектрах действия отсосов раструбов, сформулированы следующие выводы.

1. Исследование воздушных течений со взвешенными частицами вблизи открытых местных отсосов-раструбов является актуальной задачей для промышленной вентиляции.

2. Определение размеров отрывной области на входе в круглые отсосы-раструбы в неограниченном пространстве и над непроницаемой плоскостью ранее не производилось.

3. Критерии эффективности местных отсосов-раструбов не предназначены для отсосов систем улавливания пылевых частиц.

4. Расчёт поведения пылевых частиц в спектрах действия круглых отсосов-раструбов, в том числе в условиях набегающего потока, является новой, ранее не решённой задачей.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ КРУГЛОГО МЕСТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА, РАСПОЛОЖЕННОГО НАД НЕПРОНИЦАЕМОЙ ПЛОСКОСТЬЮ

Целью главы является определение влияния непроницаемой плоскости на характеристики отрывной области, образующейся на входе в раструб, на динамику пылевых частиц и коэффициенты их улавливания.

2.1. Математическая модель и вычислительный алгоритм расчета

Отсос-раструб (рисунок 2.1а) представляет собой круглый всасывающий патрубок с расширяющейся на входе частью, т.е. по сути это конфузор. Угол α - это угол раскрытия раструба, $\beta = \alpha/2$. Чаще всего, на практике, отсос-раструб расположен над непроницаемой плоскостью, что ранее в расчётах учтено не было. С острой кромки раструба происходит срыв потока и образуется вихревая область, прилегающая к стенкам раструба. Необходимо определить поле скоростей в спектре действия отсоса-раструба с учётом отрыва потока и исследовать динамику пылевых частиц.

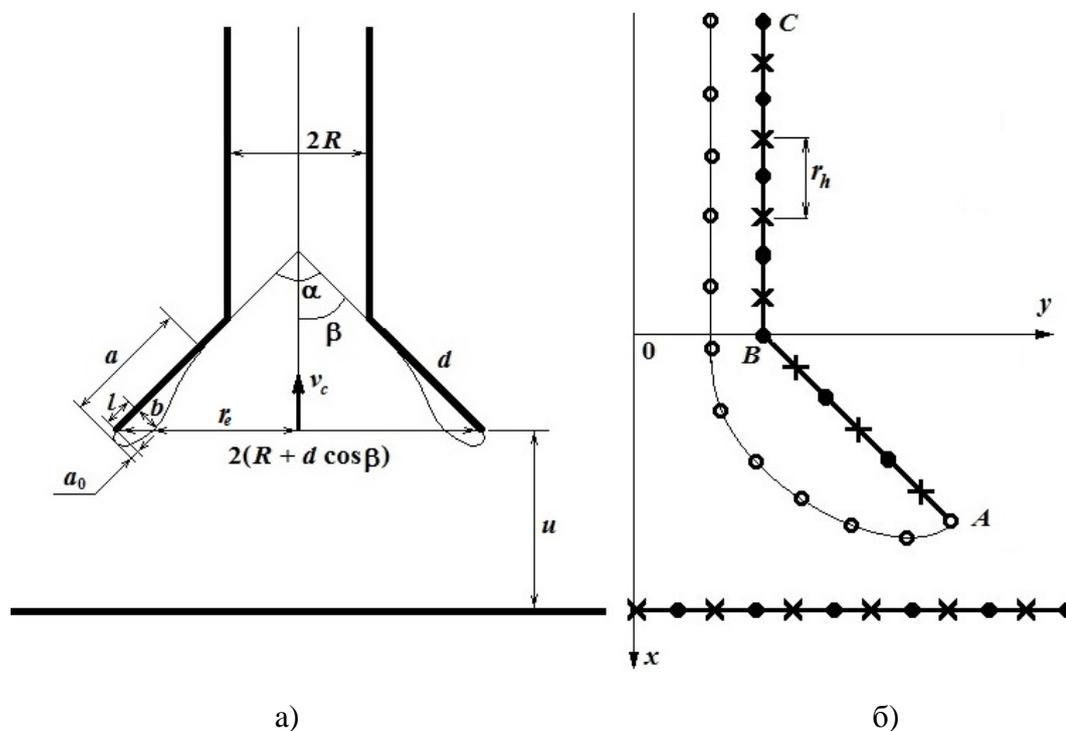


Рисунок 2.1 – Отсос-раструб над непроницаемой плоскостью: а – область течения; б – дискретная модель течения

Для разработки метода расчета использовались дискретные бесконечно тонкие вихревые кольца. Дискретизация осуществлялась вихревыми кольцами и расчётными (контрольными) точками. Они располагались на пересечении сечения и границ отсоса-раструба. Для отрывной (свободной) поверхности тока, строящейся с острой кромки раструба, задавалось приближение в начальный момент времени. Дискретная модель изображена на рисунке 2.1 б, где крестиками изображены расчётные точки, в которых выполняется условие непротекания (непроницаемости) - скорость воздуха вдоль направления внешней нормали равна нулю. Чёрные кружочки - присоединённые кольцевые вихри. Белые (полые) кружочки - свободные вихри.

Введены следующие обозначения: N , N_s - количество присоединённых и свободных вихрей (колец) соответственно; x^p - расчётная точка, $p = 1, 2, \dots, N$.

Скорость во внутренней точке x вдоль единичного вектора \vec{n} определяется с помощью формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q), \quad (2.1)$$

где $\xi^q(\xi_1, \xi_2)$ - координаты q -го присоединённого (граничного) вихревого кольца с интенсивностью $\Gamma(\xi^q)$, $\gamma = \text{const}$ - интенсивность свободного вихревого кольца с координатами $\zeta^q(\zeta_1, \zeta_2)$; функция $G(x, \xi)$ определяется по формуле (1.2).

При $|x - \xi| < r_h$:

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

где r_h - шаг дискретности (рисунок 2.1).

При $x = \xi$, функция $G(x, \xi) = 0$.

Итерационный метод расчета состоит в следующем.

Задаются начальные координаты свободных вихрей.

При $p = 1, 2, \dots, N$; $q = 1, 2, \dots, N$ определяется матрица

$$G(x^p, \xi^k) = G^{pq}.$$

Стартует первая итерация.

Вычисляется вектор-матрица свободных членов:

$$v^p = -\gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^q), \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

Определяются неизвестные значения $\Gamma^q = \Gamma(\xi^q)$ из системы уравнений:

$$\sum_{q=1}^N \Gamma^q G^{pq} = v^p, \quad p = 1, 2, 3, \dots, N.$$

С использованием формулы (2.1) строится свободная поверхность тока v_y .

Новые координаты (x', y') свободных вихрей определяется из старых по формулам:

$$x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad y' = y + \Delta t v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

где Δt - модельный шаг по времени.

Дискретная свободная поверхность тока состояла из вихревых колец, удалённых на расстояние r_h (шаг дискретности) друг от друга.

Построение продолжалось до сечения, где стенки патрубка обрываются.

Начинается следующая итерация.

Количество свободных вихрей N_s может изменяться при переходе от одной итерации к следующей. Координаты расположения свободных вихрей также принимают новые значения.

Итерационный процесс прерывался, когда координаты свободного вихревого кольца на заданном расстоянии не изменялись в пределах заданной погрешности, либо при выполнении заданного количества итераций. Обычно таких итераций было 15-20.

Заметим, что похожий метод расчета использовался для определения поля скоростей и построения свободной линии тока при входе в щелевидные и круглые отсосы, экранированные тонкими козырьками (профилями) [81], что позволило разработать способ управления воздушным потоком на входе в вытяжные каналы (Пат. RU 2503891).

После были найдены размеры отрывной области течения, показанные на рисунке 2.1.

Ширина отрывной области b определялась по известной формуле аналитической геометрии: расстояние от точки с координатами (x, y) до прямой на плоскости $x \sin \beta - y \cos \beta + B \cos \beta = 0$, проходящей через раструб. Начиная с точки $(d \cos \beta, R + d \sin \beta)$ строилась линия тока, при этом на каждом расчетном шаге определялось расстояние

$$b = |x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta|. \quad (2.2)$$

При проверке условия $|x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta| > b$, полученного на предыдущем шаге, величина b вычислялась по формуле (2.2) и определялись координаты точки (x_{\max}, y_{\max}) . Расчет производился до тех пор, пока линия тока не достигала всасывающего сечения патрубка. Размер l определялся из выражения:

$$l = \sqrt{(x_{\max} - d \cos \beta)^2 + (y_{\max} - d \sin \beta - R)^2}.$$

Величина выноса струи a_0 определялась также при построении линии тока с острой кромки $(d \cos \beta, R + d \sin \beta)$. Для определения искомой величины использовалась формула:

$$a_0 = |x \cos \beta + y \sin \beta - d - R \sin \beta|. \quad (2.3)$$

При значении $|x \cos \beta + y \sin \beta - d - R \sin \beta| > a_0$, определенного на предыдущем шаге, искомая величина вычисляется по формуле (2.3).

Величина радиуса эффективного всасывания R_s вычисляется при построении линии тока с той же точки A . Процесс вычисления выполняется до тех пор, пока $x > d \cos \beta$. Как только условие ложно, находится $R_s = y$, где y - ордината последней, найденной точки при построении линии тока.

Длина a отрывной области на входе в раструб определяется также. На каждом шаге вычислялось расстояние $|x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta|$ до раструба. При расстоянии меньшем шага дискретности, вычислялось значение данного

параметра при помощи формулы (2.3), но вместо a_0 подставлялась величина $a - a_0$.

Средняя скорость эффективного всасывания определялась при помощи следующего выражения:

$$v_e = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R_e^2}, \quad (2.4)$$

где v_{xi} - скорость воздуха в точке $x = d \cos \beta$; $y_i = y_{i-1} + h$, здесь $y_0 = 0$; $y_N = R_e$, шаг $h = 0,0001$. Нахождение суммы в числителе (2.4) производилось до тех пор, пока $|y_i - R_e| > 0,0001$.

Средняя скорость всасывания определялась с использованием следующего выражения:

$$v_0 = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R^2}, \quad (2.5)$$

где v_{xi} - скорость в точке с координатами $x = -5R$; $y_i = y_{i-1} + h$, $y_0 = 0$; $y_N = R$, $h = 0,0001$. Сумма в числителе (2.5) вычислялась до тех пор, пока $|y_i - R| > 0,0001$.

Средняя скорость в сечении раструба определялась с использованием формулы:

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{(R + d \sin \beta)^2}, \quad (2.6)$$

v_{xi} - скорость в точках с координатами $x = d \cos \beta$; $y_i = y_{i-1} + h$, $y_0 = 0$; $y_N = R + d \sin \beta$, $h = 0,0001$.

Сравнение результатов вычислительного эксперимента и данных натурального эксперимента для коэффициента неравномерности показано на рисунке 2.2.

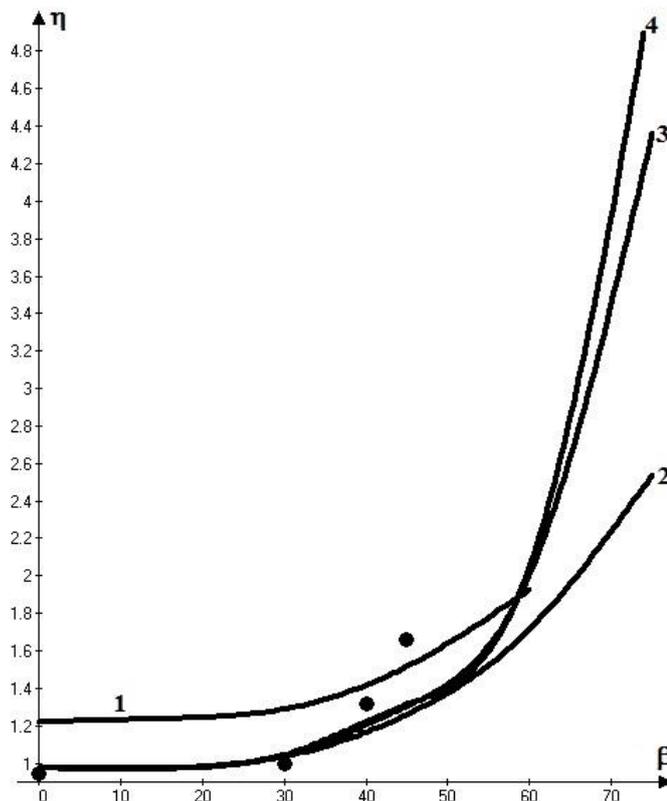


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента неравномерности η от угла раскрытия раструба: линия 1 – $\eta = v_c / v_p$ при $l/R = 2$; линия 2 – $\eta = v_c / v_e$ при $l/R = 2$; линия 3 – $\eta = v_c / v_e$ при $l/R = 5$; линия 4 – $\eta = v_c / v_e$ при $l/R = 10$

Линия 1 построена при $l/R = 2$, а коэффициент

$$\eta = v_c / v_p,$$

где v_p - средняя скорость в сечении раструба, вычисляемая по формуле (2.6).

При $\beta = 0^\circ - 30^\circ$ расчётная величина η практически постоянна (рисунок 2.2) и выше экспериментальных значений, изображённых кружочками, на величину до 30%. Эта величина снижается до $\approx 10\%$ при $\beta = 40^\circ - 50^\circ$.

Линии 2-4 построены при $l/R = 2; 5; 10$ и коэффициент неравномерности:

$$\eta = v_c / v_e,$$

v_e - средняя скорость эффективного всасывания, определённая по формуле (2.4).

Здесь имеется лучшее совпадение с экспериментами [92]: при $\beta = 0^\circ - 30^\circ$ расхождение до 1%; при $\beta = 40^\circ - 50^\circ$ погрешность вычислительного эксперимента относительно натурального достигает 30%.

Качественно в обоих случаях имеется хорошее совпадение вычислительных и натуральных экспериментов, однако, при вычислительном эксперименте не наблюдается столь резкого возрастания коэффициента η начиная с 30° . При увеличении длины раструба имеется более резкое возрастание этой кривой. Данные вычислительного и натурального экспериментов фиксируют наиболее равномерное всасывание при $\beta \leq 30^\circ$.

В работе [92] изложены данные экспериментальных исследований скорости воздуха v/v_c при удалении от раструба, изображенные на рисунке 2.3 кружочками. Эти экспериментальные величины соответствуют исследованиям течениям вблизи квадратных и прямоугольных раструбов с соотношением сторон до 1:4 и углом раскрытия $50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Сведений о длинах раструба в источнике [92] не было приведено. Верхняя линия (рисунок 2.3) построена по данным вычислительного эксперимента при $\alpha = 30^\circ$ и длине раструба $d/R = 2$; средняя линия - $\alpha = 38^\circ$ и $d/R = 2$; нижняя линия - $\alpha = 45^\circ$ и $d/R = 2$. По оси абсцисс для эксперимента использовались величины эквивалентного диаметра $d_e = 2ab/(a+b)$, где b, a - ширина и длина раструба. Для круглого раструба $d_e = 2(R+d \sin \beta)$. Сравнение с экспериментальными данными расчётов для безразмерной осевой скорости показывает удовлетворительное согласование указанных величин (рисунок 2.3).

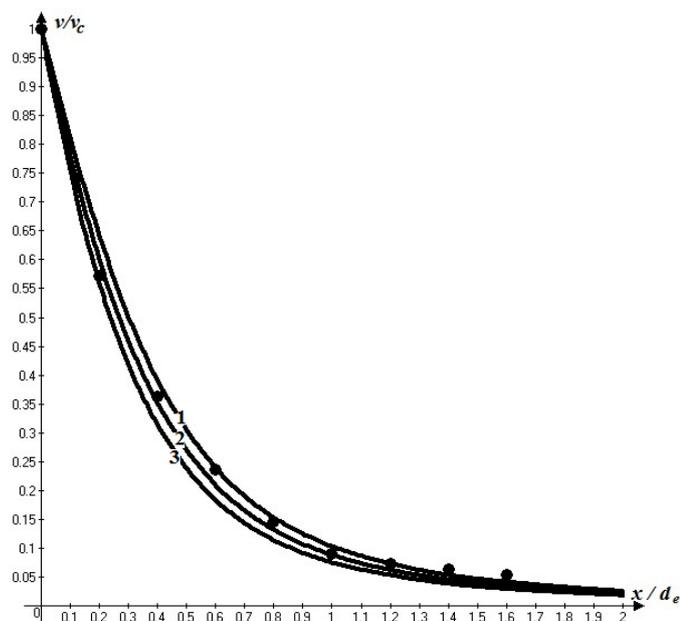


Рисунок 2.3 – Зависимость безразмерной осевой скорости от расстояния до раструба: • - данные [92]; линия 1 – $\alpha = 30^\circ$, $d/R = 2$; линия 2 – $\alpha = 38^\circ$, $d/R = 2$; ; линия 3 – $\alpha = 45^\circ$, $d/R = 2$

Вычисленные величины скорости на оси отсоса (сплошная линия) выше экспериментальных значений [95] (кружочки) и экспериментальной линии В.Н.Посохина [2] (штрихпунктирная линия) на величину до 13% (рисунок 2.4). При удалении от сечения патрубка данное отличие снижается.

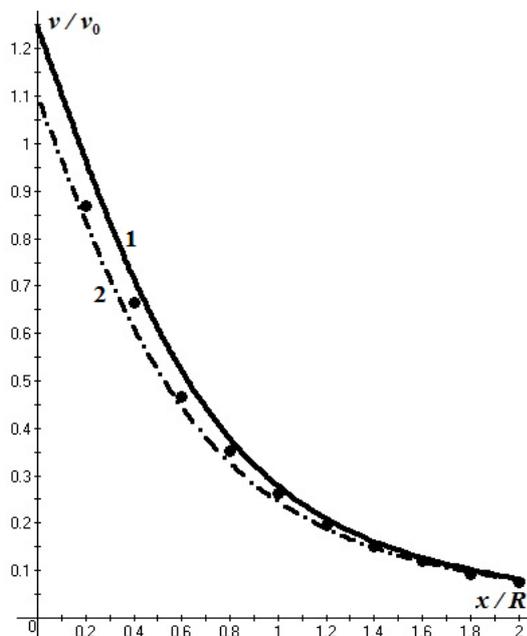


Рисунок 2.4 – Зависимость осевой скорости от расстояния до всасывающего сечения патрубка:

- - эксперименты [95]; 1 – расчетная кривая; 2 – кривая В.Н. Посохина

Вычисленная величина радиуса эффективного всасывания $R_s = 0,88R$ превышает расчет Посохина В.Н. [2] на величину $(0.88 - 0.81) / 0.81 \cdot 100\% = 8,6\%$.

Коэффициент сжатия отрывной струи $\delta_\infty / R \approx 0.7$. По формуле Борда к.м.с. входа в патрубок:

$$\zeta = \left(1 - \frac{1}{\delta_\infty^2}\right)^2 \approx 1.08,$$

что превышает экспериментальную величину Идельчика И.Е. на 8%.

Из сравнений вычислительных и натуральных экспериментов следует вывод о достоверности метода моделирования воздушных течений вблизи местного отсоса.

2.2. Движение пылевых частиц в воздушном потоке

Дифференциальное уравнение динамики пылевых частиц [3] имело следующий вид:

$$\frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p \vec{g} - \psi \chi S_m \rho_a \frac{|\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a| \cdot (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a)}{2}, \quad (2.7)$$

где \mathbf{v}_a – вектор скорости воздушного потока; ρ_a – его плотность; \mathbf{v}_p – вектор скорости пылевой частицы; ρ_p , d_e , χ – её плотность, эквивалентный диаметр и коэффициент формы; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения; $S_m = \pi d_e^2 / 4$; ψ – коэффициент сопротивления воздушного потока:

$$\begin{aligned} \text{Re} < 1 &\Rightarrow \psi = \frac{24}{\text{Re}}; \quad 1 \leq \text{Re} < 10^3 \Rightarrow \psi = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\text{Re}^{\frac{2}{3}}}{6}\right); \\ \text{Re} \geq 10^3 &\Rightarrow \psi = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{6.5 \text{Re}^{\frac{2}{3}}}{100}\right)^{\frac{3}{2}}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $\text{Re} = \frac{|\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a| \rho_a d_e}{\mu}$, μ – динамическая вязкость воздушного потока.

Уравнение (2.7) сводится к системе обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{px} - v_{ax}| (v_{px} - v_{ax}), \\ \frac{dx}{dt} = v_{px}, \\ \frac{dv_{py}}{dt} = -g - \frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{py} - v_{ay}| (v_{py} - v_{ay}), \\ \frac{dy}{dt} = v_{py}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Система (2.9) решается при помощи метода Рунге-Кутты.

В дальнейшем изложении введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_1 &= x, & y_2 &= y, & y_3 &= v_{px}, & y_4 &= v_{py}, \\ f_1 &= y_3, & f_2 &= y_4, & f_3 &= -\frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |y_3 - v_{ax}| (y_3 - v_{ax}), \\ f_4 &= -g - \frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |y_4 - v_{ay}| (y_4 - v_{ay}), \end{aligned}$$

Численное интегрирование системы (2.9) производилось по следующим этапам.

1. С использованием известных начальных условий (при $t = 0$ $y_j = y_{j0}$, $j = 1, 2, 3, 4$) и заданном временном шаге $\Delta\tau$ определялись массивы коэффициентов:

$$\begin{aligned} k_{1j} &= \Delta\tau \cdot f_j; & y_j &= y_{j0} + 0,5 \cdot k_{1j}; \\ k_{2j} &= \Delta\tau \cdot f_j; & y_j &= y_{j0} + 0,5 \cdot k_{2j}; \\ k_{3j} &= \Delta\tau \cdot f_j; & y_j &= y_{j0} + k_{3j}; \\ k_{4j} &= \Delta\tau \cdot f_j. \end{aligned}$$

Вычисления производились по каждой из формул при изменении величины $j = 1, 2, 3, 4$.

2. Вычисляются значения y_1, y_2, y_3, y_4 в следующий момент времени $t = t + \Delta\tau$: $y_j = y_{j0} + (k_{1j} + 2k_{2j} + 2k_{3j} + k_{4j}) / 6$, $j = 1, 2, 3, 4$.

3. Координаты частицы и проекции скорости получают свои новые значения: $y_{j0} = y_j$, $j = 1, 2, 3, 4$ и производится переход к пункту 1.

Построение траектории пылевой частицы производилось до пересечения всасывающего сечения, или до осаждения на непроницаемую плоскость.

Особенности построения предельной траектории пылевой частицы заданного диаметра состояли в следующем. Начальное положение пылинки: $y_1 = d \cos \beta$, $y_2 = R$. Скорости вылета принимались нулевыми. Величина U_l обозначала ординату частицы пыли, улавливаемой патрубком, а U_p - не улавливаемую, $S_r = (U_p + U_l) / 2$. В начальный момент времени задавалось $U_l = R$, $U_p = 30R$. Организовывался внешний циклический расчёт пока выполнялось условие $|U_p - U_l| > 0,00000001$. Внутренний цикл состоял в построении траектории пылевых частиц, пока выполнялось условие $y_1 > -R/2$ и $y_1 < 30R$. При окончании внутреннего цикла расчета проверялось условие $y_3 < 0$. В случае истинности этого условия $U_l = S_r$, в ином случае $U_p = S_r$. После этого переменные получали свои новые значения. $S_r = (U_p + U_l) / 2$, $y_1 = d \cos \beta$, $y_2 = S_r$, $y_3 = 0$, $y_4 = 0$.

Входные данные произведённых расчетов: плотность пыли $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$; коэффициент динамической формы пылевой частицы $\chi = 1$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; плотность окружающего воздуха $\rho_a = 1,2 \text{ кг/м}^3$; вязкость воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; шаг по времени для дифференциальных уравнений (2.7) $\Delta\tau = 0,00005 \text{ с}$; $r_h = 0,0025 \text{ м}$; стенки патрубка и радиус плоскости удалялись на расстояние $60R$; шаг для построения линий тока $0,00001 \text{ м}$; интенсивность свободной вихревой поверхности тока $\gamma = -0,02$; средняя скорость всасывания $v_0 = 10 \text{ м/с}$. Вычислительные эксперименты выполнялись при радиусе $R = 0,1 \text{ м}$ и затем приводились к безразмерному виду. В данном случае количество итераций для уточнения положения свободной поверхности тока равнялась 15.

Составляющие скорости воздушного потока на каждом шаге решения системы (2.9) вычислялись по формуле:

$$v_n(x) = \frac{10 \left(\sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) \right)}{|v_0|},$$

для определения v_x принималось $\vec{n} = \{1, 0\}$, для v_y - $\vec{n} = \{0, 1\}$. Скорость v_0 определялась по формуле (2.5) при изменении угла раскрытия раструба и его длины. Для корректного сравнения произведённых расчетов, найденная величина скорости делилась на $|v_0|$ и домножалась на заданную величину средней скорости в патрубке, равной 10м/с, что и учтено в приведённой формуле.

Объем фигуры между плоскостью А-А (рисунок 2.5), проходящей через острые кромки раструба и поверхностью, состоящей из предельных траекторий частиц пыли назывался объёмом аспирации V_a . Для конкретной пылинки он определялся при помощи построения предельной траектории данной частицы. Начальное значение переменной $V_a = 0$, в процессе вычислений оно принимает следующее значение:

$$V_a = V_a + \pi(y_1 - y_1') (y_2^2 + y_2 y_2' + y_2'^2) / 3,$$

где y_1', y_2' - координаты пылинки на предыдущем шаге по времени. Даная вычислительная процедура производилась пока истинны условия $y_1 > y_1'$ и $y_2 > 0,001$.

Надписи 10, 20, 30, ..., 120 на рисунке 2.5 над предельными траекториями обозначают диаметр пылевых частиц в мкм, для которых они построены.

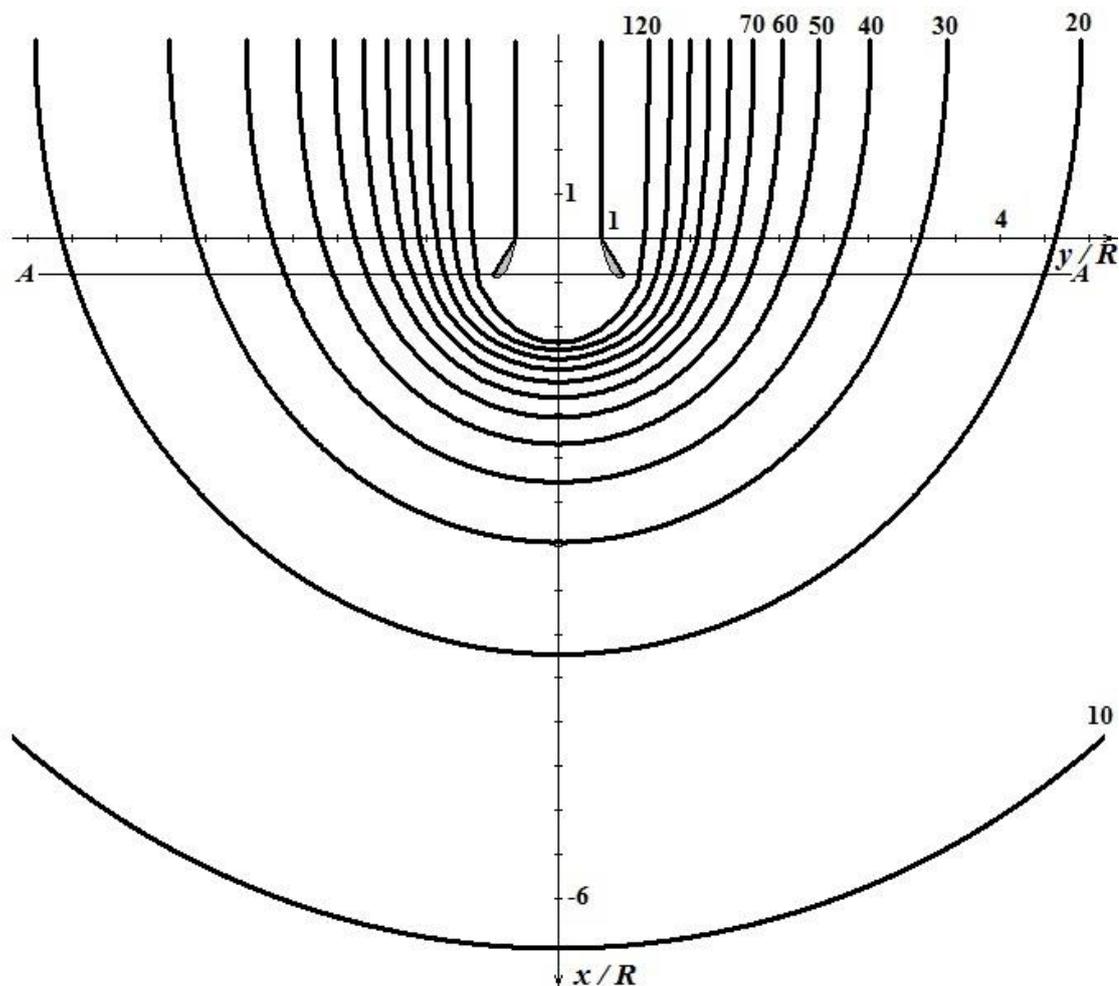


Рисунок 2.5 – Предельные траектории частиц пыли вблизи круглого отсоса-раструба с углом раскрытия $\alpha = 60^\circ$ и длиной равной 1 калибру

Используя найденную величину объема аспирации предлагается критерий эффективности местного отсоса-раструба, улавливающего пылевую частицу с известным диаметром, формой и плотностью, называемый коэффициент улавливания

$$k = V_a / V_0,$$

V_0 - объем аспирации всасывающего круглого патрубка.

Величина $k \geq 1$ во всех случаях. Чем выше величина k , тем более эффективнее местный отсос-раструб. Предлагаемый коэффициент улавливания более содержателен, чем коэффициент неравномерности, так как учтена не только проекция вектора скорости воздушного потока на вертикальную ось, но и на

горизонтальную ось. Горизонтальная составляющая скорости сносит пылевые частицы в зону более эффективного улавливания.

На рисунках 2.6-2.8 изображены линии тока и предельные траектории пылевых частиц при скорости всасывания 10м/с для раструбов длиной 1, 3 и 5 калибров.

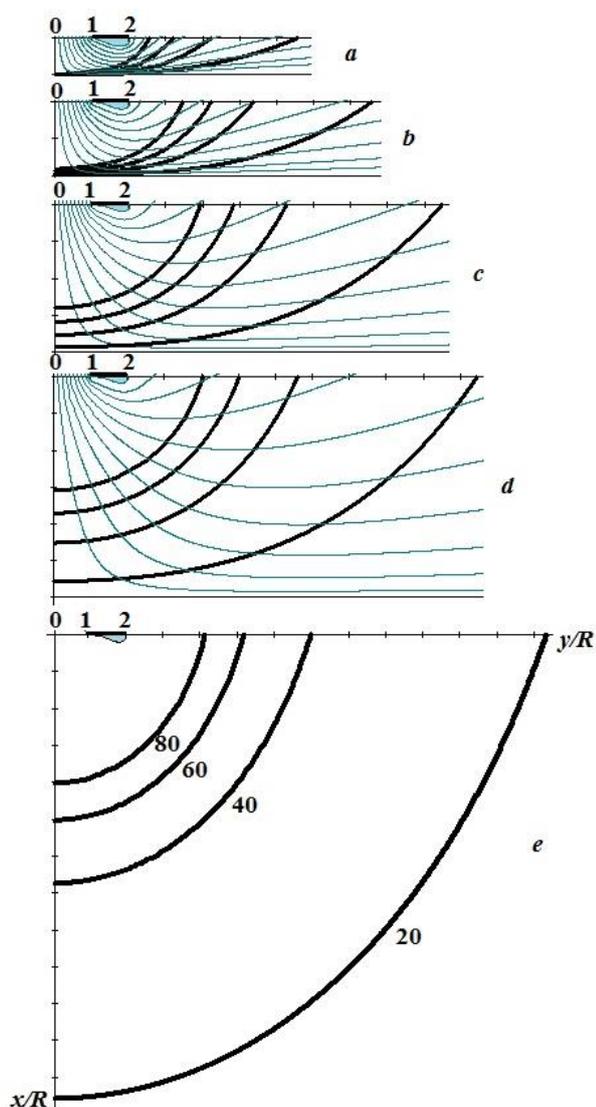


Рисунок 2.6 – Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20мкм,40мкм,60мкм, 80мкм в спектре действия отсоса-раструба длиной $1R$, $\beta = 90^\circ$ и разным удалением от плоскости: *a*) $u = 1$; *b*) $u = 2$; *c*) $u = 4$; *d*) $u = 6$; *e*) без плоскости

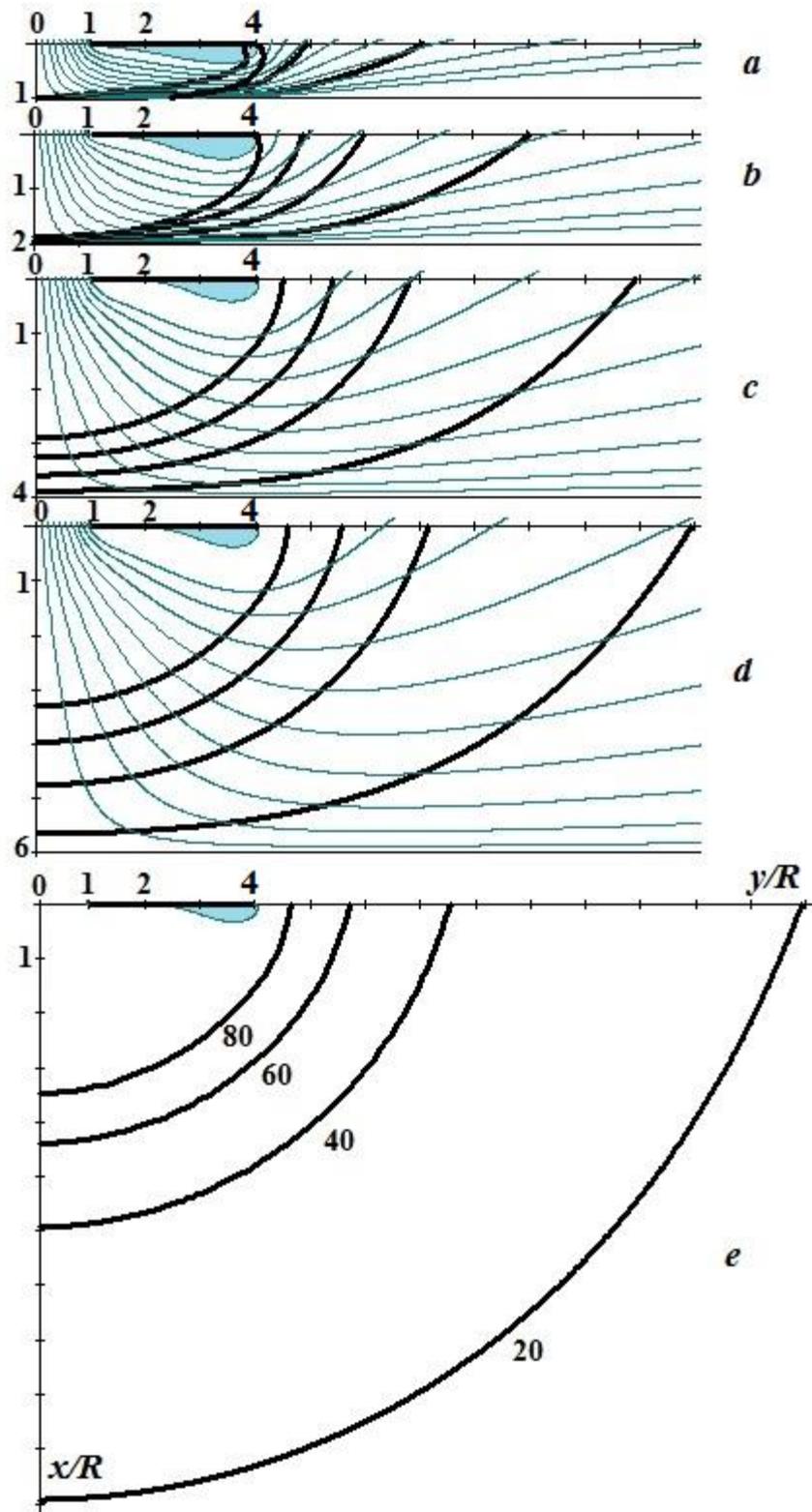


Рисунок 2.7 – Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20мкм,40мкм,60мкм, 80мкм в спектре действия отсоса-раструба длиной $3R$, $\beta = 90^\circ$ и разным удалением от плоскости: *a*) $u = 1$; *b*) $u = 2$; *c*) $u = 4$; *d*) $u = 6$; *e*) без плоскости

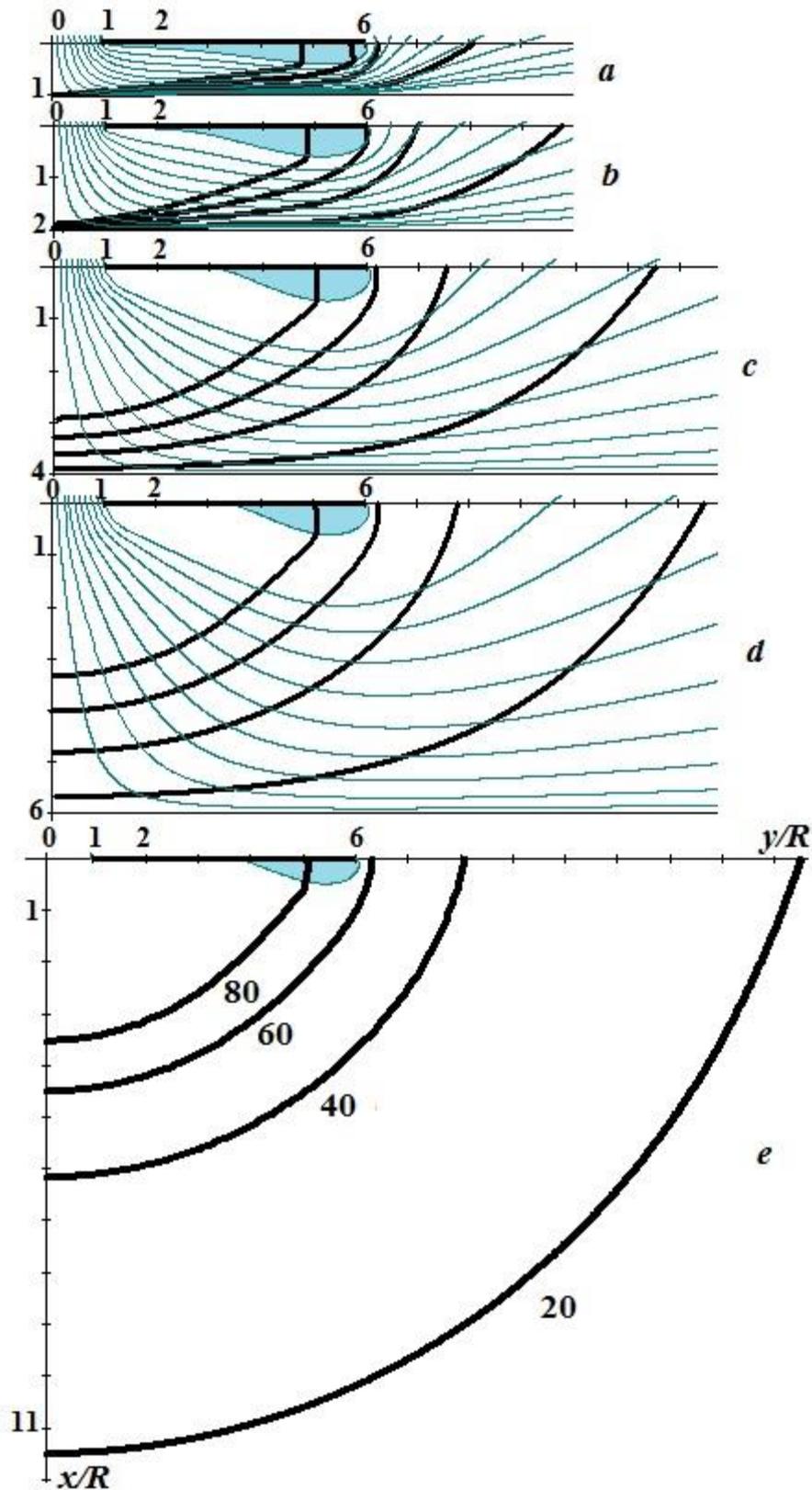


Рисунок 2.8 – Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20мкм,40мкм,60мкм, 80мкм в спектре действия отсоса-раструба длиной $5R$, $\beta = 90^\circ$ и разным удалением от плоскости: *a*) $u = 1$; *b*) $u = 2$; *c*) $u = 4$; *d*) $u = 6$; *e*) без плоскости

Строились предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20мкм, 40мкм, 60мкм, 80мкм. Наибольшая длина траектории и объем аспирации у частицы диаметром 20 мкм. При увеличении диаметра пылевой частицы длина траектории и объем аспирации уменьшаются. Чем ближе расположена непроницаемая плоскость, тем меньше объёмы аспирации для всех пылевых частиц. На рисунках заметно уменьшение размеров отрывной области течения на входе в раструб при его удалении от непроницаемой плоскости. Заметим, что в случае попадания пылевой частицы внутрь отрывной области наблюдается вертикальное осаждение пылевой частицы в этой области (рисунок 2.7а, рисунок 2.8 а-е).

Как видно из рисунка 2.9, наиболее эффективным является раструб с углом полураскрытия $\beta = 90^\circ$, что наблюдалось ранее и для неограниченного пространства [6, 48, 75, 112]. Цифрами 20, 40, 60, 80 здесь и далее обозначены диаметры пылевых частиц в микрометрах. Отметим, что при удалении отсоса-раструба от плоскости при фиксированной длине раструба, коэффициент улавливания снижается.

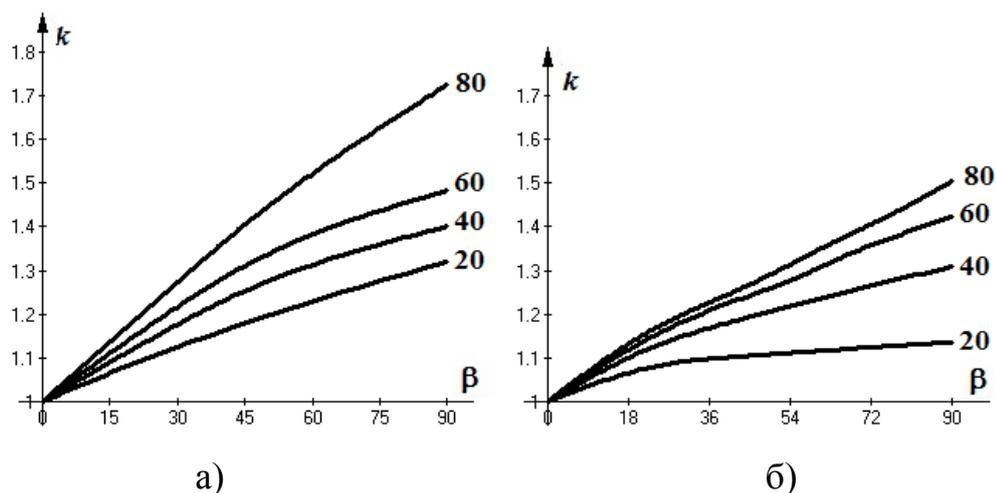


Рисунок 2.9 – Изменение коэффициента улавливания от угла полураскрытия раструба при его длине равной 2 калибра: а) при удалении в 1 калибр от непроницаемой плоскости; б) при удалении в 2 калибра от непроницаемой плоскости

Коэффициент улавливания растёт при увеличении длины раструба, независимо от расстояния до непроницаемой плоскости (рисунок 2.10), однако

темп этого роста падает с увеличением расстояния до плоскости. Чем больше диаметр пылевой частицы, тем выше темп роста коэффициента улавливания, однако наблюдается его замедление при длинных раструбах.

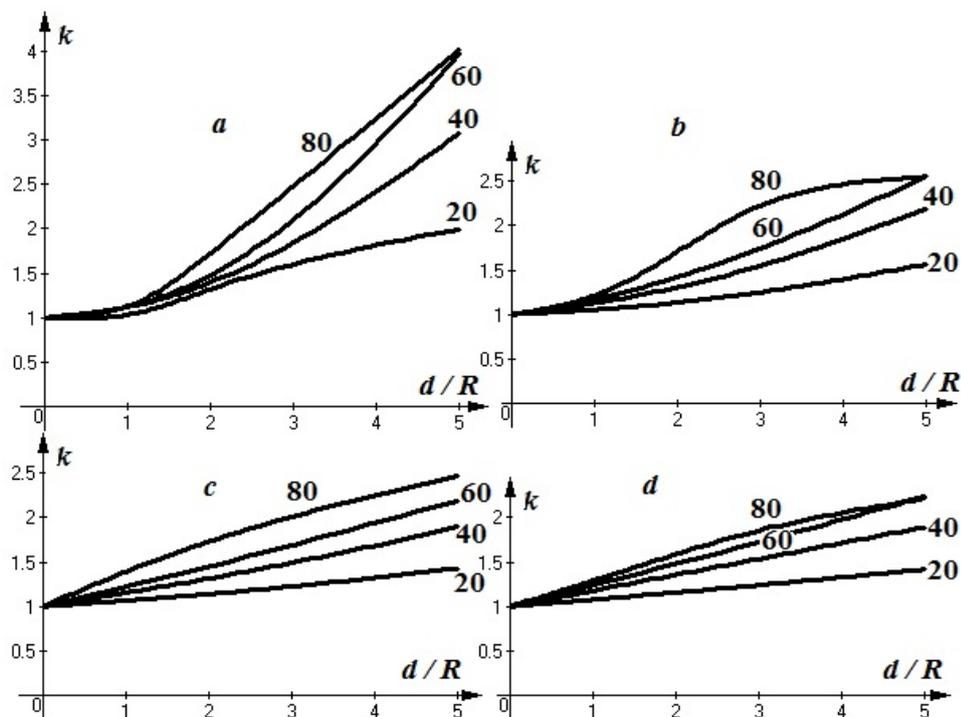


Рисунок 2.10 – Изменение коэффициента улавливания при $\beta = 90^\circ$ от безразмерной длины раструба и удаления от непроницаемой плоскости: а) R ; б) $2R$; в) $4R$; г) $6R$

Как видно из рисунка 2.11, наличие плоскости оказывает существенное влияние на объем области аспирации. При удалении плоскости объем аспирации быстрее приближается к величине объема аспирации без плоскости для более крупных частиц. К примеру, для частиц диаметром 80 мкм объем аспирации приближается к объёму аспирации без плоскости уже при удалении $6R$. А для частиц диаметром 20 мкм наличие плоскости на этом расстоянии оказывает весьма существенное влияние на объем аспирации и при $u = 6R$ объем аспирации составляет всего 40% от объёма аспирации для случая отсутствия непроницаемой плоскости. Заметим, также, что длина раструба оказывает несущественное влияние на коэффициент V_a/V_a^b : графики, изображённые на рисунке 2.11, а близки с графиками рисунка 2.11 б.

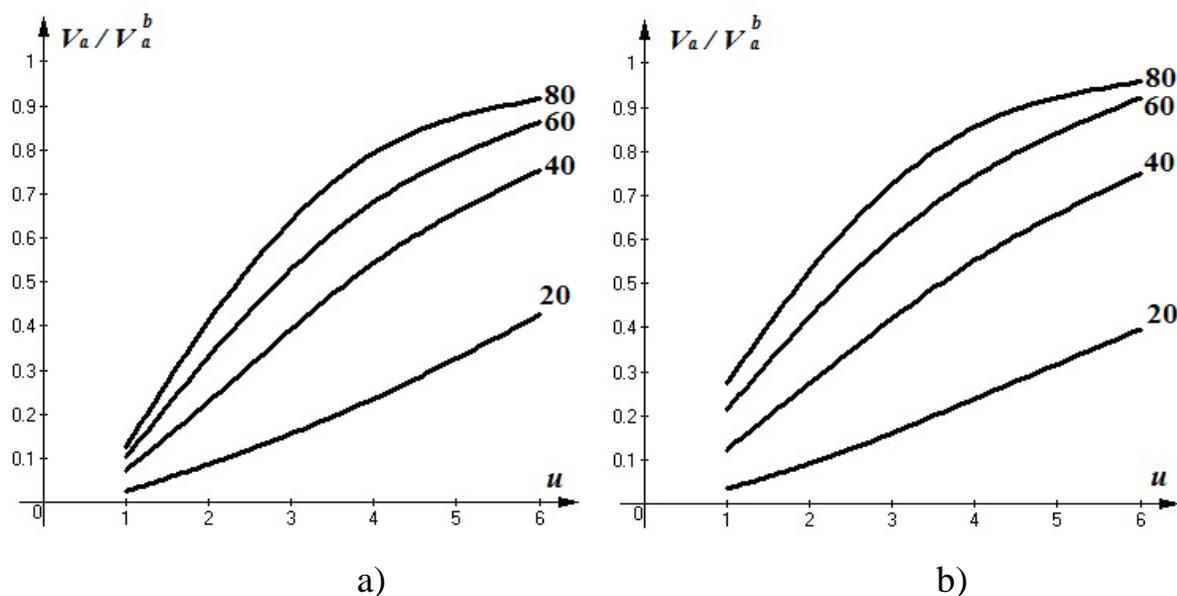


Рисунок 2.11 – Изменение величины отношения объёма аспирации к объёму аспирации без непроницаемой плоскости V_a/V_a^b от удаления u до плоскости: а) $d = R$; б) $d = 5R$

2.3. Характеристики отрывной области

Параметры отрывной области в обозначениях рисунка 2.1 а изображены на рисунке 2.12, где цифрами 1, 2, 4, 6 обозначено удаление u от непроницаемой плоскости в калибрах. Наблюдается рост всех характерных размеров отрывной области с увеличением длины раструба. Как видно, длина отрывной области a увеличивается при приближении к плоскости (рисунок 2.12 а). Вынос струи за раструб (рисунок 2.12 б) и максимальная толщина отрывной области (рисунок 2.12 с) вначале возрастают при удалении от плоскости, затем убывают, имеют максимум при $u \approx 5R$.

Вычислительный эксперимент показал, что максимум радиуса эффективного всасывания наблюдается в диапазоне $60^\circ - 65^\circ$ (рисунок 2.13). Радиус эффективного всасывания вначале растёт вследствие увеличения размера отрывной области в сечении раструба, затем он резко убывает до единицы при угле 90° , вследствие замыкания границы отрыва на внутренней стороне раструба и снижения данного размера.

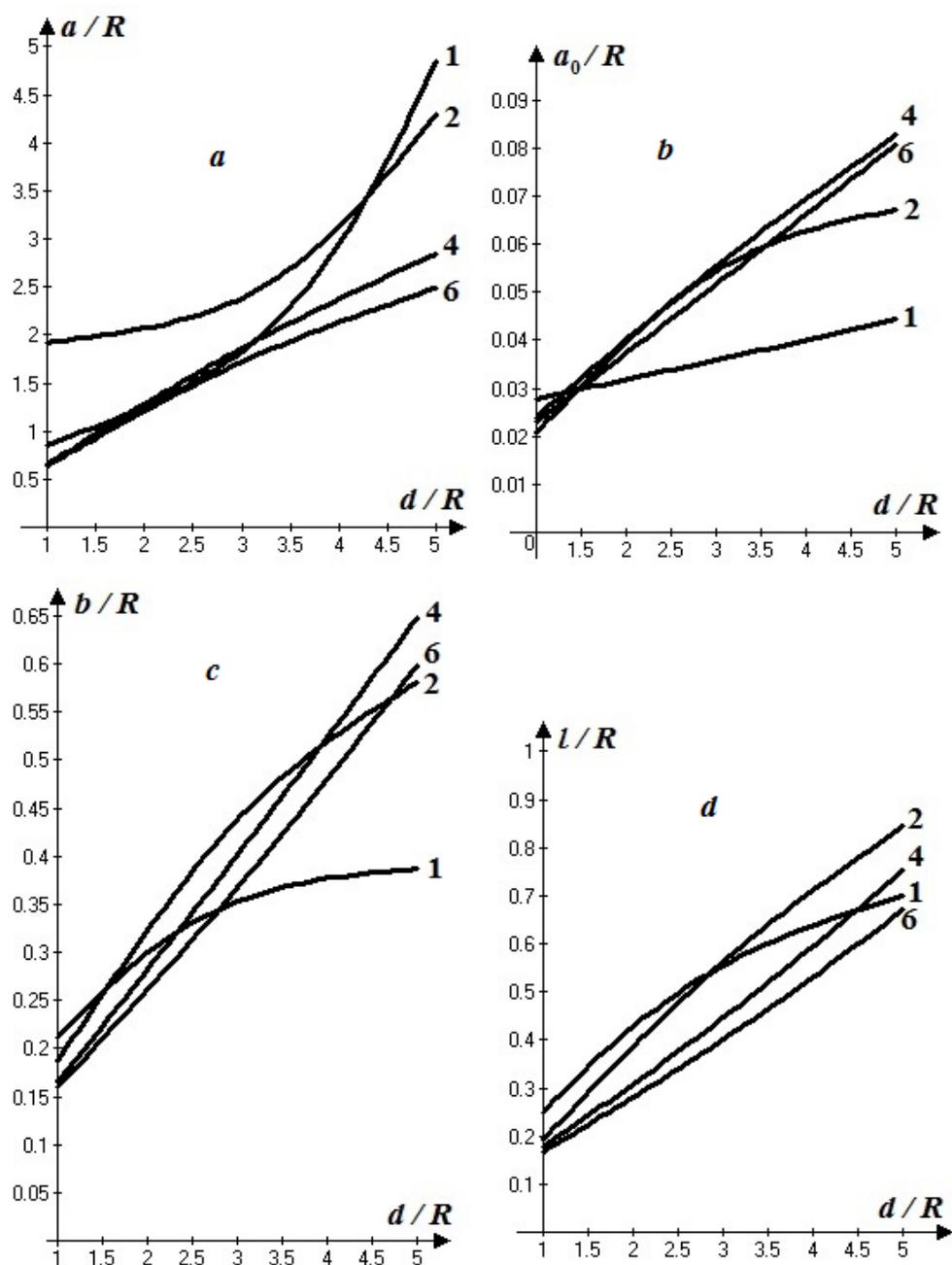


Рисунок 2.12 – Изменение параметров вихревой области в зависимости от длины раструба и разной удаленности от плоскости

В результате обработки данных вычислительных экспериментов получена следующая формула для расчета границы отрыва воздушного потока при входе в отсос-раструбы над непроницаемой плоскостью:

$$\bar{x}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2.5\pi}{3.1t-4.5\pi}}}{R(t-1.5\pi)^b} \cos t, \quad \bar{y}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2.5\pi}{3.1t-4.5\pi}}}{R(t-1.5\pi)^b} \sin t + 1 + \bar{d}, \quad 1.5\pi < t \leq 2.5\pi, \quad (2.8)$$

где $\bar{x}(t) = x(t)/R$; $\bar{y}(t) = y(t)/R$;

$$a = (0.03\bar{d} - 0.034) \frac{\beta}{\pi} + 0.01\bar{d} + 0.032, \quad \bar{d} = d/R, \quad b = 0.14(1 + 1/\bar{u}), \quad \bar{u} = u/R.$$

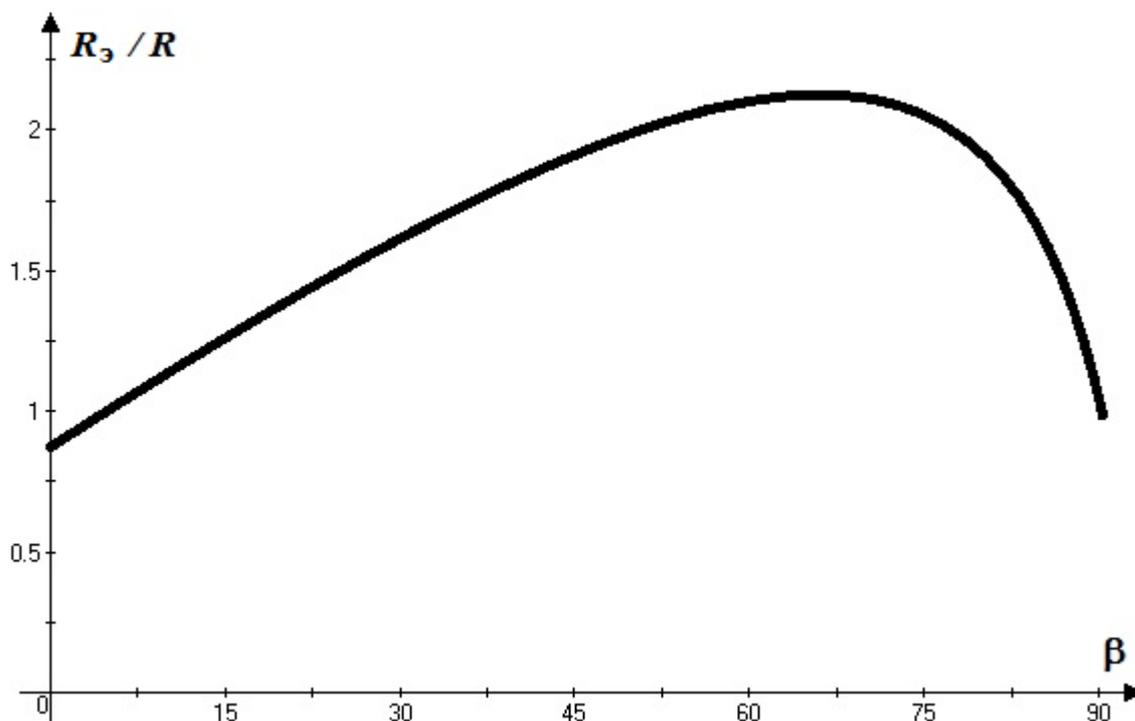


Рисунок 2.13 – Зависимость радиуса эффективного всасывания от угла наклона раструба при длине раструба и удалении до плоскости равными 2 калибра

Пусть, например:

$$u = 1, \quad \bar{d} = 1 \Rightarrow a = (0.03 - 0.034) \frac{1}{2} + 0.01 + 0.032 = 0.04; \quad b = 0.28;$$

$$u = 2; \quad b = 0.21; \quad \bar{d} = 5 \Rightarrow a = (0.15 - 0.034) \frac{1}{2} + 0.05 + 0.032 = 0.14.$$

На рисунке 2.14 приведены примеры расчета границы отрыва воздушного потока по формуле, которые изображены сплошной линией. Расчетные значения по разработанной компьютерной программе изображены штриховой линией.

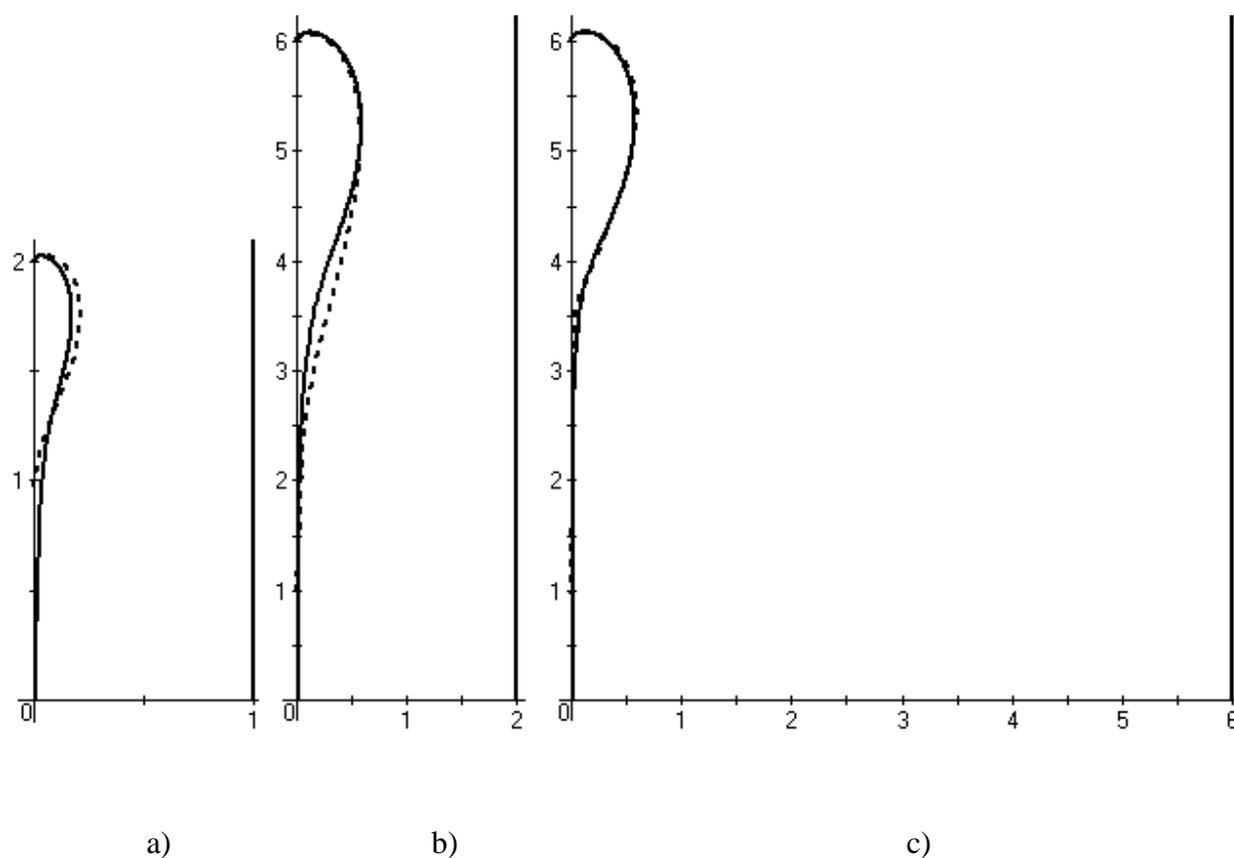


Рисунок 2.14 – Отрывная линия тока: а) $u = 1, d=1$; б) $u = 2, d=5$; в) $u = 6, d=5$

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана математическая модель алгоритм расчета пылевоздушных потоков в зоне действия местного отсоса-раструба, расположенного над непроницаемой плоскостью.

2. Определены закономерности изменения коэффициентов улавливания для пылевых частиц разных фракций. Показано, что наиболее эффективный захват пылевых частиц производится местным вентиляционным отсосом - раструбом с углом раскрытия равным 180° . Для такого отсоса-раструба построены области аспирации при различных длинах раструба и удалённости от непроницаемой плоскости.

3. На основании вычислительных экспериментов, произведённых по разработанной компьютерной программе, определены характерные размеры отрывной области на входе в сток-раструб, расположенный над непроницаемой плоскостью. Предложена аналитическая формула для определения линии отрыва на входе в раструб с углом раскрытия 180° , расположенного над непроницаемой плоскостью, профилирование по которой позволит снизить коэффициент местного сопротивления при входе в местный отсос-раструб.

4. Введён критерий эффективности местного отсоса-раструба, названный коэффициентом улавливания пылевой частицы, равный отношению объёма аспирации отсоса-раструба к объёму аспирации круглого вытяжного патрубка.

3. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

3.1. Разработка вычислительного алгоритма расчета воздушного потока вблизи круглого вытяжного патрубка

В предыдущей главе для построения вычислительного алгоритма расчета отрывного воздушного потока использовались стационарные дискретные вихри. На свободной поверхности тока задавалась циркуляция свободных вихрей, после чего приближённо определялась средняя скорость во всасывающем патрубке и поле скоростей. Набегающий поток было можно учитывать только в случае, если его скорость меньше скорости всасывания в патрубке. Представляет интерес модернизировать этот метод, что позволит рассчитывать характеристики отрывного течения, как для низкоскоростного, так и высокоскоростного набегающего потока. Очевидно, это можно сделать, если задавать скорость всасывания в патрубке, а циркуляцию на свободной вихревой пелене определять в процессе численного решения задачи.

Целью параграфа является развитие метода расчета отрывного воздушного течения вблизи тонкостенного всасывающего патрубка при набегании внешнего потока и его верификация.

3.1.1. Описание вычислительного алгоритма

Дискретная математическая модель (рисунок 3.1) строилась при помощи дискретных вихревых колец. Присоединённые вихревые кольца изображены черными кружочками на рисунке 3.1, а контрольные точки крестиками. На оси симметрии во всасывающем сечении размещено вихревое кольцо нулевого радиуса, поэтому оно не учитывалось. Число вихревых колец равнялось числу контрольных точек. На стенках патрубка в контрольных точках выполнялось условие непроницаемости – проекция скорости на нормаль равна нулю. В сечении всасывания проекция скорости на направление внешней нормали равна v_0 .

Вихревые кольца и расчётные (контрольные) точки располагались равномерно, последние находились по центру между вихревыми кольцами.

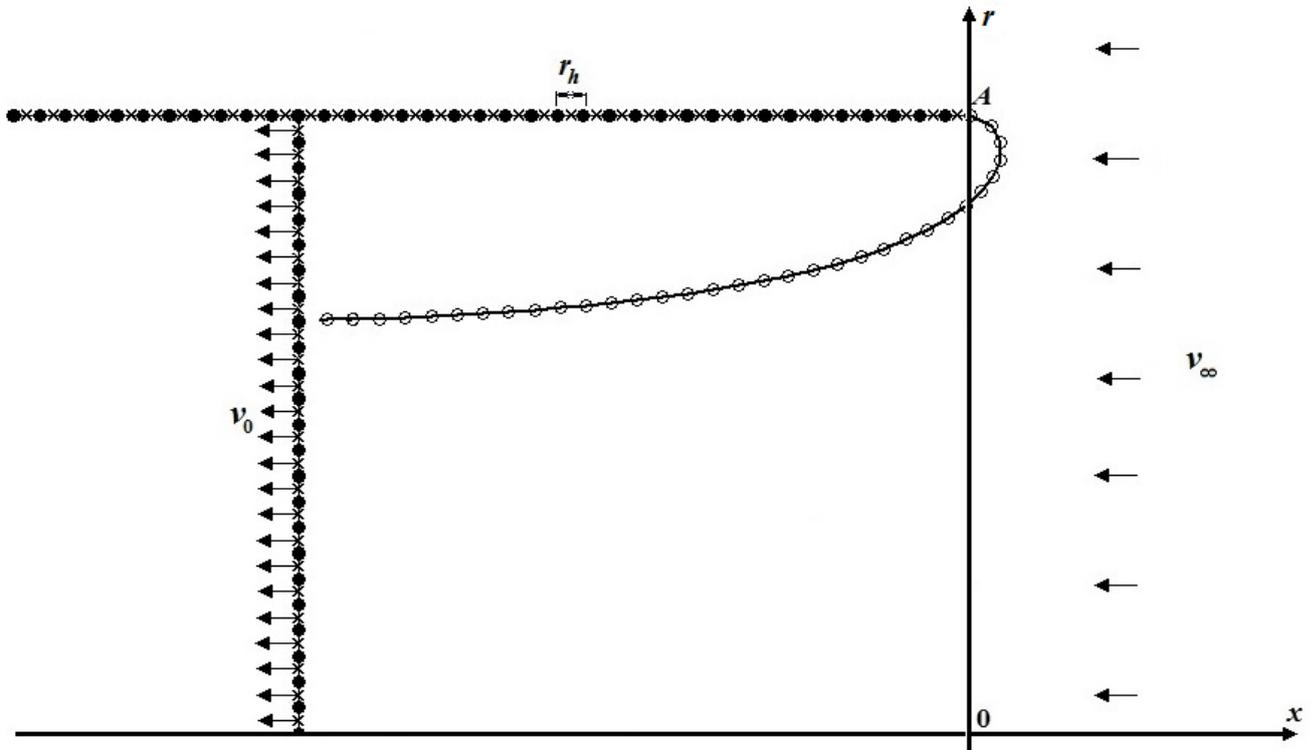


Рисунок 3.1 – Дискретная модель отрывного воздушного течения при входе в круглый патрубок

В качестве шага дискретности r_h выбиралось расстояние между соседними вихревыми кольцами. Отрывная поверхность воздушного потока, состоящая из свободных вихревых колец (белые кружочки на рисунке 3.1), образуется на кромке A . Перпендикулярно всасывающему сечению набегают воздушный поток со скоростью v_∞ .

Здесь используются те же обозначения, что и в п.2.1.

Скорость воздушного потока в точке x вдоль единичного направления n вычисляется при помощи формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) + n_1 v_\infty. \quad (3.1)$$

Вычислительный алгоритм претерпевает некоторые изменения относительно п.2.1. После формирования двумерного массива

$G^{pq} = G(x^p, \xi^q)$; $p = 1, 2, \dots, N$; $q = 1, 2, \dots, N$ вводится одномерный массив $G(x^p, \xi^1) = P(x^p)$, $p = \overline{1, N}$, в который помещаются значения двумерного массива при первой неизвестной интенсивности вихря, лежащего на кромке A . Нумерация вихрей произведена с этой острой кромки.

Вычислительный итерационный процесс состоял из следующих шагов.

1. Составляется вектор-массив свободных членов

$$v^p = -n_1 v_\infty - \sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q), \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

2. Изменяются начальные коэффициенты:

$$G(x^p, \xi^1) = P(x^p) + \sum_{k=1}^{N_s} G(x^p, \xi^k), \quad p = \overline{1, N}.$$

На первой итерации $N_s = 0$ и коэффициенты $G(x^p, 1)$ не изменяются.

3. Определяются неизвестные $\Gamma(\xi^q)$ из системы линейных уравнений:

$$\sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x^p, \xi^q) = v(x^p), \quad p = 1, 2, 3, \dots, N$$

Интенсивность свободного вихревого слоя: $\gamma = \Gamma^1$.

4. Строится отрывная поверхность тока с кромки A .

При помощи формулы (3.1) вычисляются составляющие скорости v_x , v_r . Следующая точка (x', r') поверхности тока определяется из предыдущей (x, r) :

$$x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_r^2}, \quad r' = r + \Delta t v_r / \sqrt{v_x^2 + v_r^2}.$$

Итерационный вычислительный процесс продолжается до тех пор, пока разность между старым и новым значениями интенсивности γ по абсолютной величине больше заданной точности ε .

3.1.2. Верификация метода расчета

Расчёты производились при $\varepsilon = 10^{-8}$, $r_h = 0,000625$ м, радиус патрубка $R = 0,1$ м, скорость всасывания $v_0 = 1$ м/с; удаление вытяжного сечения от входа в

патрубок $6R$; длина стенки патрубка $11R$, шаг построения линии тока $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Результаты расчета представлены в безразмерном виде. Масштаб длины - R , масштаб скорости - v_0 .

Результаты построения критической линии тока при скорости v_∞ набегающего потока, превосходящей скорости всасывания представлены v_0 на рисунке 3.2. Здесь введены следующие обозначения: I – расчёты при $\bar{v} = v_\infty / v_0 = 2$; II – при $\bar{v} = 10$; III – при $\bar{v} = 50$; линия 1 – расчёт Гильфанова А.К., Зарипова Ш.Х. [28] в рамках потенциальной модели методом граничных элементов, линия 2 – расчёт методом дискретных вихрей без учёта отрыва потока по разработанным в данной работе алгоритмам; линия 3 – расчёт в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости (численное решение уравнений Навье-Стокса) [28]; линия 4 - расчёт по разработанному методу; 5 – это свободные поверхности тока, построенные по разработанным алгоритмам.

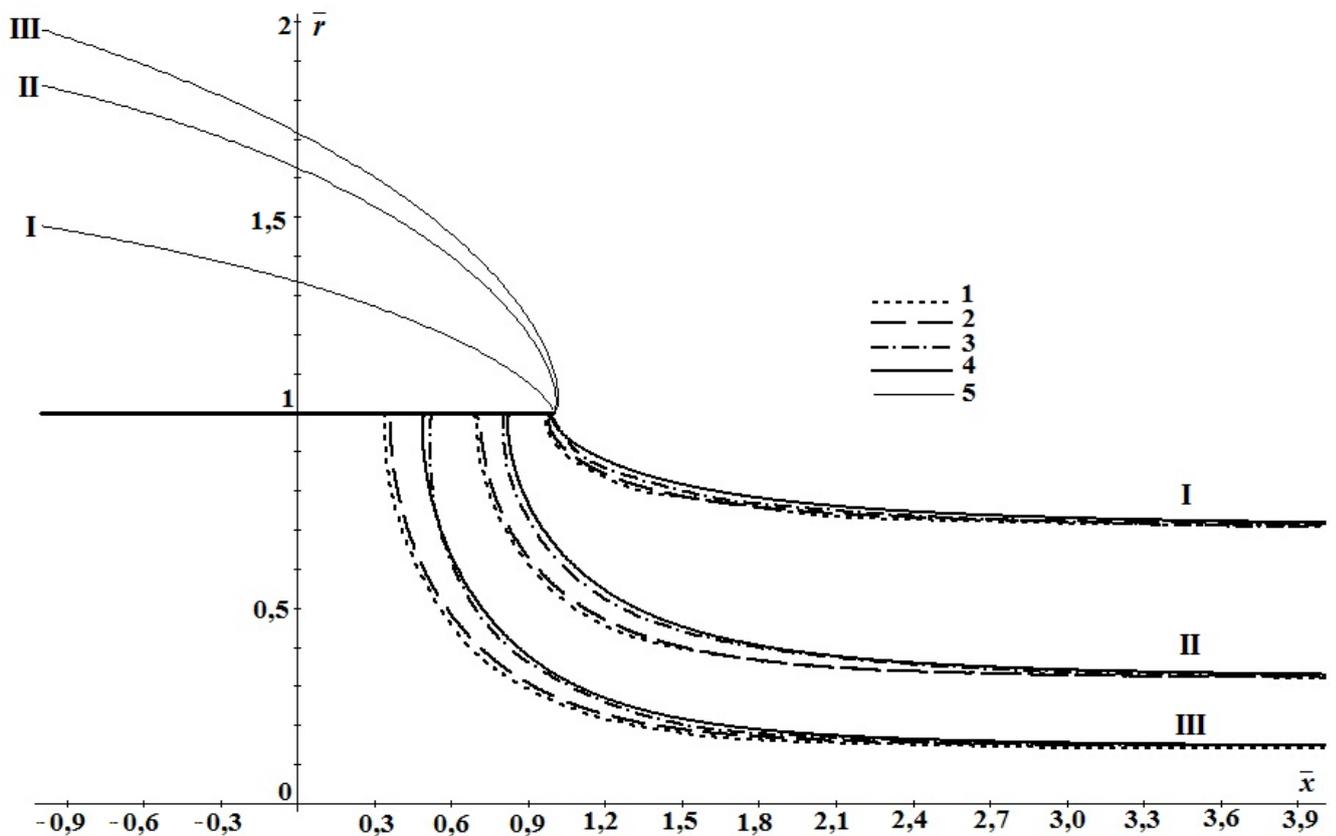


Рисунок 3.2 – Критические и свободные линии тока
вблизи круглого всасывающего патрубка с тонкими стенками

Сравнение данных расчётов показывает, что построенная критическая линия тока адекватна, причём она более близка к линии, построенной с учётом вязкости.

Сравнение расчётных картин течения при $\bar{v} = 50$ представлены на рисунке 3.3. Пунктирной линией изображена критическая линия тока. Линии тока имеют идентичный характер за исключением отрывной области. В рамках модели вязкой несжимаемой среды размеры отрывной области течения меньше.

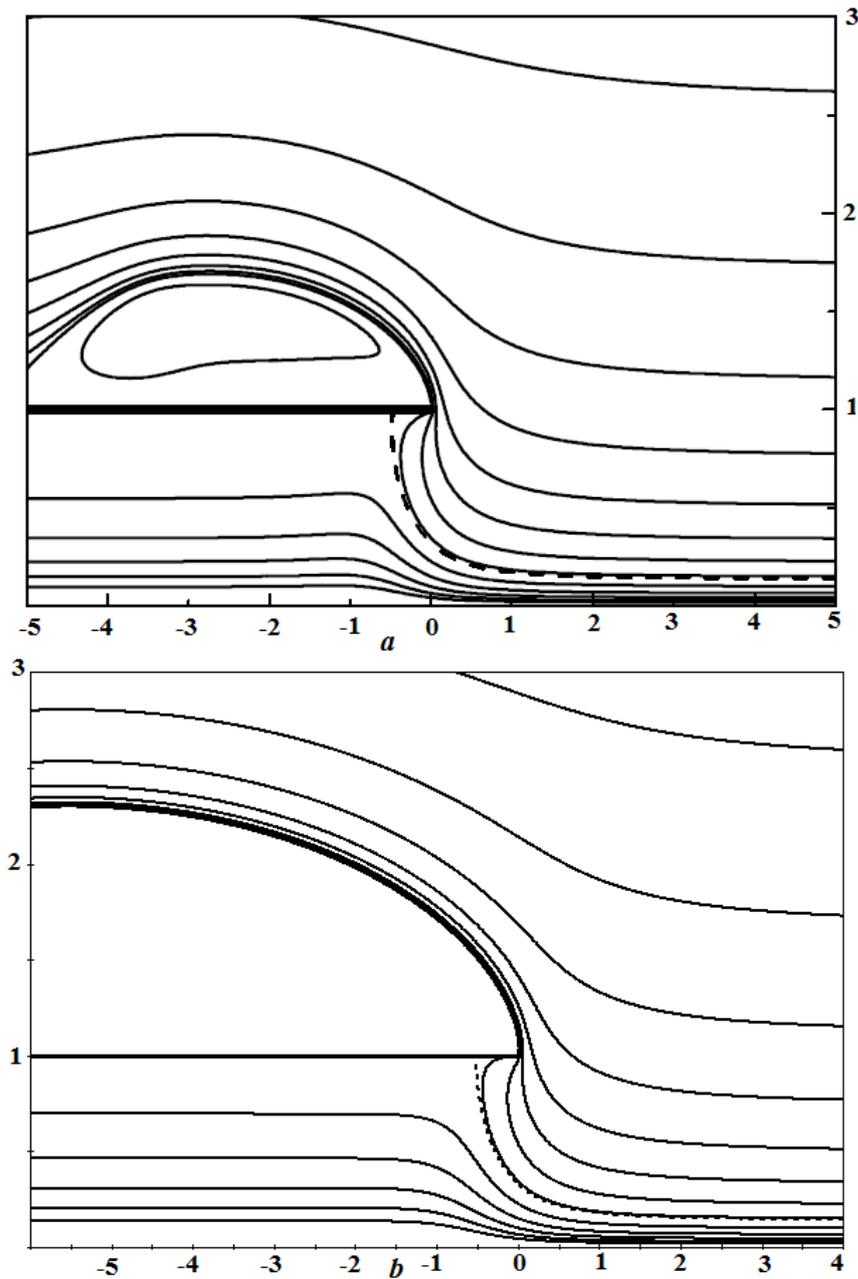


Рисунок 3.3 – Линии тока при $\bar{v} = 50$: a – расчёты в рамкой модели вязкой несжимаемой жидкости [28], b – расчёты по разработанной вычислительной процедуре

Расчёты при $\bar{v} = 0,02$ также практически совпадают (рисунок 3.4). Небольшое отклонение видно для границы отрывной области. В рамках модели вязкой несжимаемой жидкости она сужается при удалении во всасывающем канале, в отличие от произведённых в рамках данной работы расчётах.

Расчёты выполнялись при разных скоростях набегающего потока, но не превосходящих скорости всасывания. Пунктиром изображена критическая линия тока. При всей схожести картин течения, видно, что на входе в щелевидный всасывающий канал отрывная область, построенная методом конформных отображений, уже, чем отрывная область, построенная по разработанной вычислительной процедуре. В рамках модели вязкой несжимаемой жидкости расчётная ширина отрывной области значительно шире, но имеет конечную длину, в сравнении с расчётами, полученными в рамках других моделей.

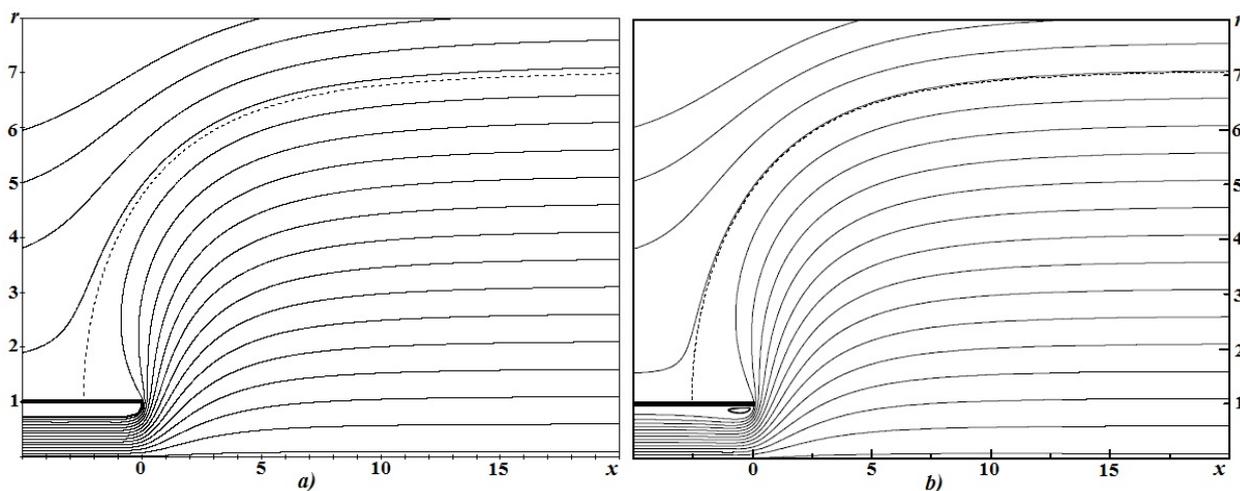


Рисунок 3.4 – Линии тока при $\bar{v} = 0,02$: *a* – расчёты по разработанному методу;
b – модель вязкой несжимаемой жидкости [28]

В задачах аспирации представляет интерес изучить динамику пылевых частиц в спектре действия круглого тонкостенного канала, определить предельные траектории пылевых частиц и коэффициент аспирации.

Поэтому в данной работе были построены предельные траектории пылевых частиц с использованием системы дифференциальных уравнений их движения:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{u_x - v_x}{\tau}, \quad \frac{dx}{dt} = v_x, \quad \frac{dv_r}{dt} = \frac{u_r - v_r}{\tau}, \quad \frac{dr}{dt} = v_r,$$

где $\tau = 2R \cdot \text{Stk} / v_\infty$ - время релаксации, Stk - число Стокса; u_x, u_r - составляющие скорости среды; v_x, v_r - составляющие скорости частиц, t - время.

Рисунок 3.5 демонстрирует картины течения вблизи щелевидного и круглого всасывающего канала, построенные в рамках модели потенциальных течений с использованием метода конформных отображений [59], вязкой несжимаемой жидкости с использованием численного решения уравнений Навье-Стокса [28] и модели, представленной в этой работе.

Вычислительный алгоритм построения предельной траектории частицы пыли, также как и в п.2.2 основывался на методе половинного деления. Задавалось число Стокса, начальное положение пылевой частицы, определялось время релаксации.

Скорость вылета пылевой частицы полагалась равной скорости внешнего набегающего потока. Переменные $U_l = R$, $U_p = 40R$, $S_r = (U_p + U_l) / 2$. Вычислительный циклический процесс производился до тех пор, пока выполнялось условие $|U_p - U_l| > 0,00000001$. Во внутреннем цикле строились траектории частиц пыли. При выходе из него проверялось попадание пылевой частицы в патрубок. Если это происходило, то $U_l = S_r$, иначе $U_p = S_r$, после чего координаты вылета пылевой частицы принимали значение $(100R, S_r)$. Расчёты производились по разработанной компьютерной программе [123] (приложение А).

Коэффициент аспирации определялся из формулы:

$$A = \frac{v_\infty}{v_0} \frac{R_c^2}{R^2},$$

где R_c - расстояние от оси отсоса предельной траектории частицы, построенной с точки, удалённой от входа в патрубок на расстояние $100R$.

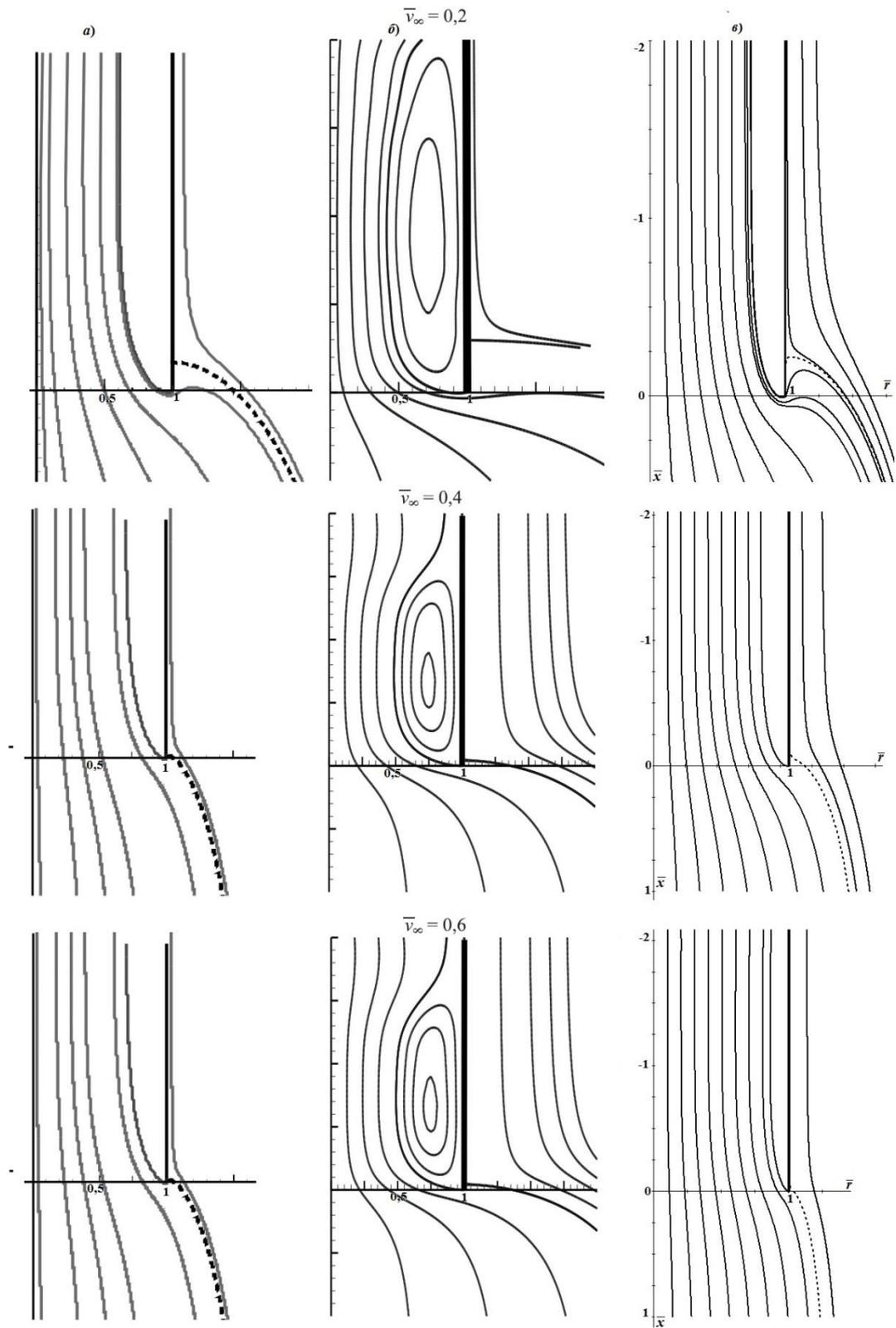


Рисунок 3.5 – Сравнение линий тока, построенных: а) для щелевого всасывающего канала методом конформных отображение [59]; б) для щелевого всасывающего канала в рамках модели вязкой жидкости [60]; в) для круглого патрубка по разработанному методу

Сравнение графиков коэффициента аспирации от скорости внешнего потока при разных числах Стокса представлены на рисунке 3.6, где наблюдается хорошее согласование расчетов с использованием разработанной вычислительной процедуры и расчетов, проведённых в [28], в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости. Максимальное различие наблюдается при $Stk=0,1$ и $\bar{v} = 0,02$, но и оно не превышает 7%.

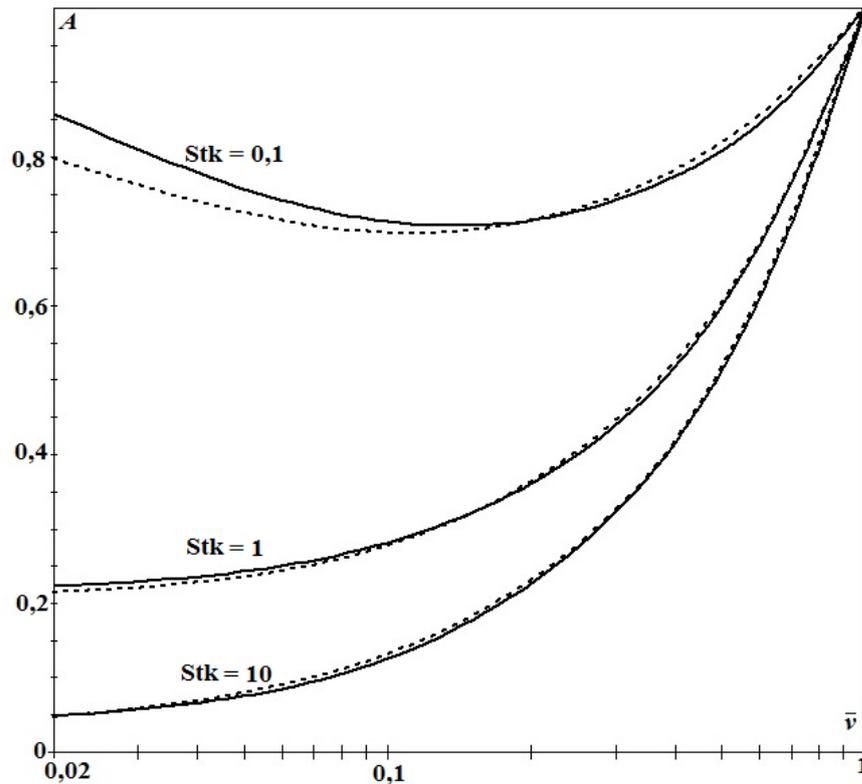


Рисунок 3.6 – Графики функций коэффициента аспирации A от скорости \bar{v}

3.2. Расчёт отрывного воздушного течения вблизи круглого всасывающего патрубка

Целью параграфа являлся расчёт размеров отрывной области (рисунок 3.7) при входе в круглый патрубок с тонкими стенками при разных скоростях набегающего потока.

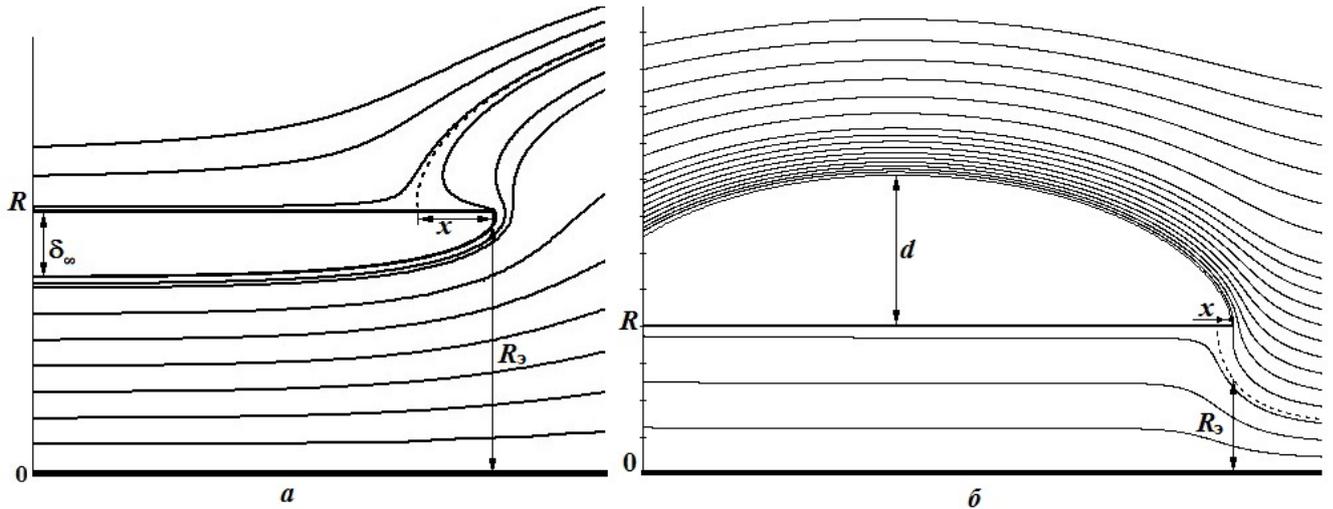


Рисунок 3.7 – Характерные размеры отрывной области: а) скорость набегающего потока меньше скорости всасывания; б) скорость набегающего потока больше скорости всасывания

Дискретная модель (рисунок 3.8) строилась аналогично вышеописанному в п. 3.1.1, за исключением распределения скорости во всасывающем сечении, где задавалось распределение скорости, соответствующее вязкому течению в круглой трубе со средней скоростью v_0 : $v = 2v_0(1 - r^2 / R^2)$.

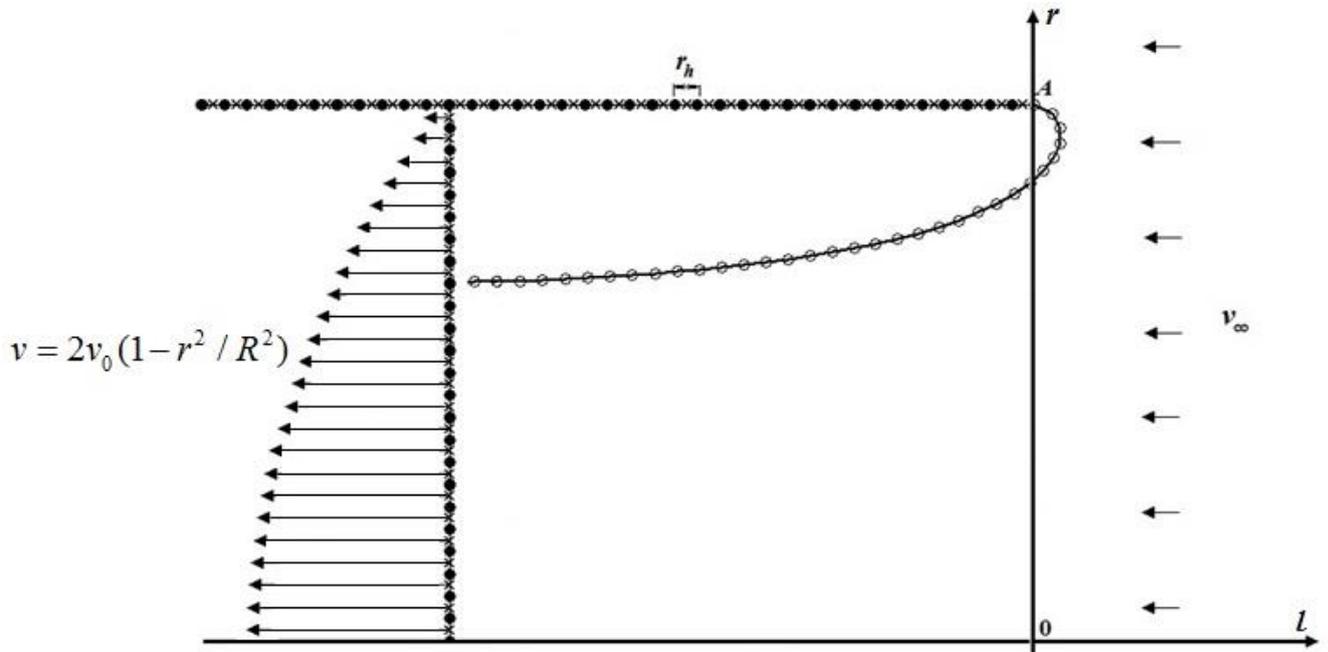


Рисунок 3.8 – Дискретизация границы области

Радиус патрубка $R = 0,1\text{ м}$; средняя скорость $v_0 = 1\text{ м/с}$, шаг дискретности $r_h = 0,0003125\text{ м}$. Результаты расчёта представлялись в безразмерном виде:

$\bar{v} = v_{\infty} / v_0$; $\bar{R}_s = R_s / R$; $\bar{d} = d / R$; $\bar{\delta}_{\infty} = \delta_{\infty} / R$; $\bar{x} = x / R$; $\bar{\gamma} = \gamma / (Rv_0)$. В остальном вычислительный алгоритм был такой же, как и в предыдущем случае.

При снижении скорости набегающего потока интенсивность вихрей на свободной поверхности тока уменьшается (рисунок 3.9). При равенстве скоростей набегающего потока и всасывания, имеется точка перегиба, интенсивность вихрей принимает нулевое значение, затем снижается, принимая отрицательное значение.

В случае, когда скорость набегающего потока больше скорости всасывания изменение размеров отрывной области воздушного потока проиллюстрировано на рисунке 3.10. Расстояние \bar{x} и максимальная величина \bar{d} возрастают, а радиус эффективного всасывания \bar{R}_s снижается при увеличении скорости набегающего потока.

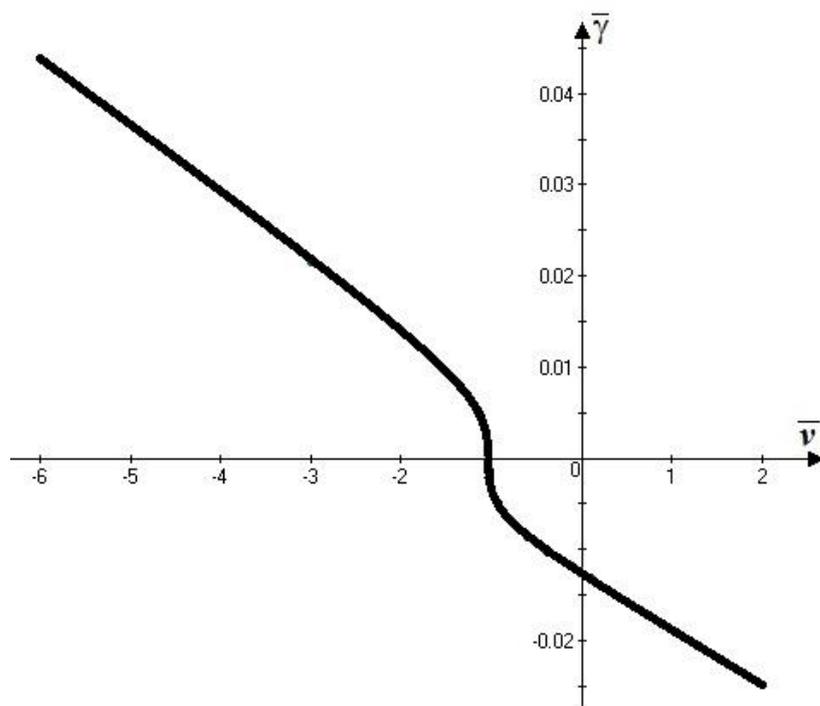


Рисунок 3.9 – Изменение интенсивности свободных вихрей

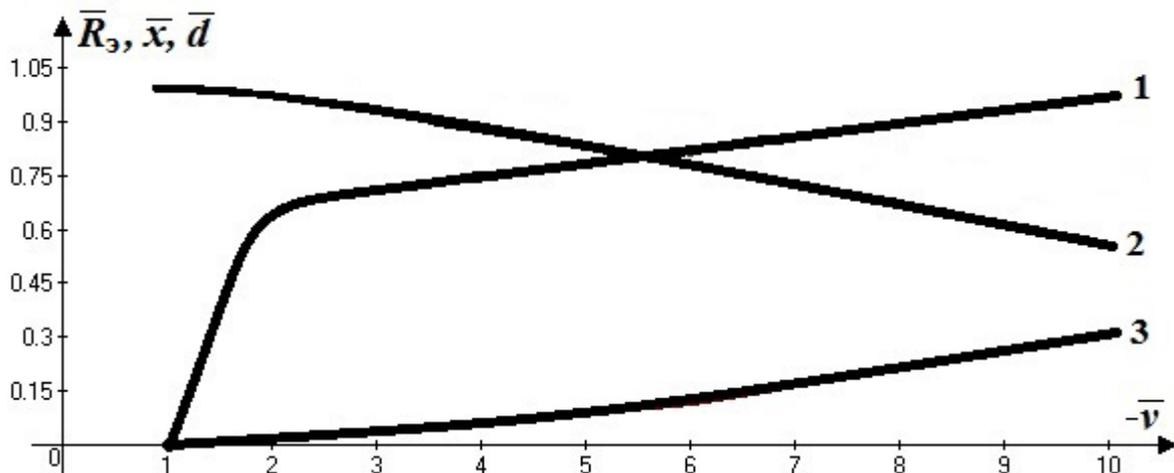


Рисунок 3.10 – Изменение размеров отрывной области: 1 – $\bar{d}(\bar{v})$; 2 – $\bar{R}_3(\bar{v})$; 3 – $\bar{x}(\bar{v})$

При скорости набегающего внешнего потока меньшей скорости во всасывающем сечении, но, совпадающих по направлению, величина \bar{x} убывает от ∞ до 0 (рисунок 3.11).

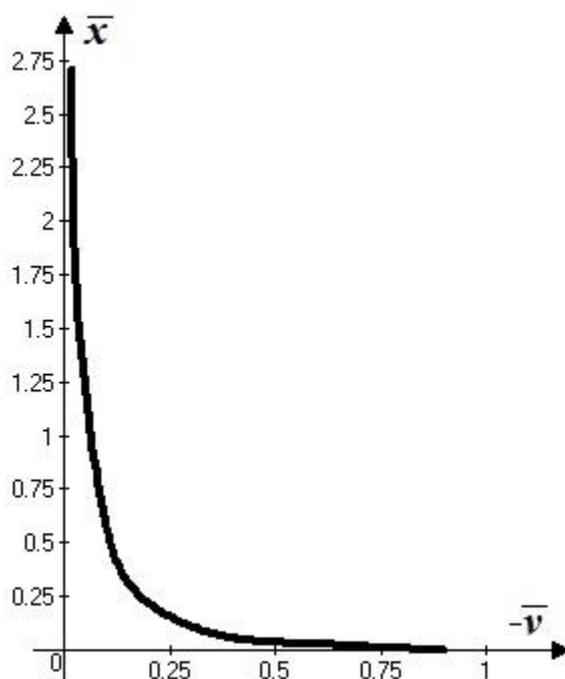


Рисунок 3.11 – Изменение параметра \bar{x} при скорости набегающего потока меньшей скорости всасывания

При отрыве воздушного потока внутрь патрубка изменения размеров отрывной области построены в зависимости от величины и направления скорости

$$\bar{R}_3 = 0.0010187\bar{v}^8 - 0.0097301\bar{v}^7 + 0.0284889\bar{v}^6 - 0.0204664\bar{v}^5 - 0.0480592\bar{v}^4 + \\ + 0.0997709\bar{v}^3 - 0.0337484\bar{v}^2 - 0.2166366\bar{v} + 0.9050001.$$

Для линии 2 в том же диапазоне:

$$\bar{\delta}_\infty = -0.0014444\bar{v}^8 + 0.0117944\bar{v}^7 - 0.0236783\bar{v}^6 - 0.0028135\bar{v}^5 + 0.0405085\bar{v}^4 - \\ - 0.0397074\bar{v}^3 + 0.0701657\bar{v}^2 - 0.1806756\bar{v} + 0.7040562.$$

В рамках усовершенствованного метода расчета представилось возможным построить картину течения, где граница отрывной области замыкается на внутреннюю поверхность трубы (рисунок 3.14). Здесь расчёт производился при: $r_h = 0,000625$ м; $R = 0,1$ м; $v_0 = 1$ м/с; $\varepsilon = 10^{-7}$. Здесь, как только точка, свободной линии тока приближалась к границе трубы на расстояние меньшее r_h и проходила внутрь патрубка на расстояние большее $0.1R$, производилось прерывание вычислительного процесса построения свободной линии тока.

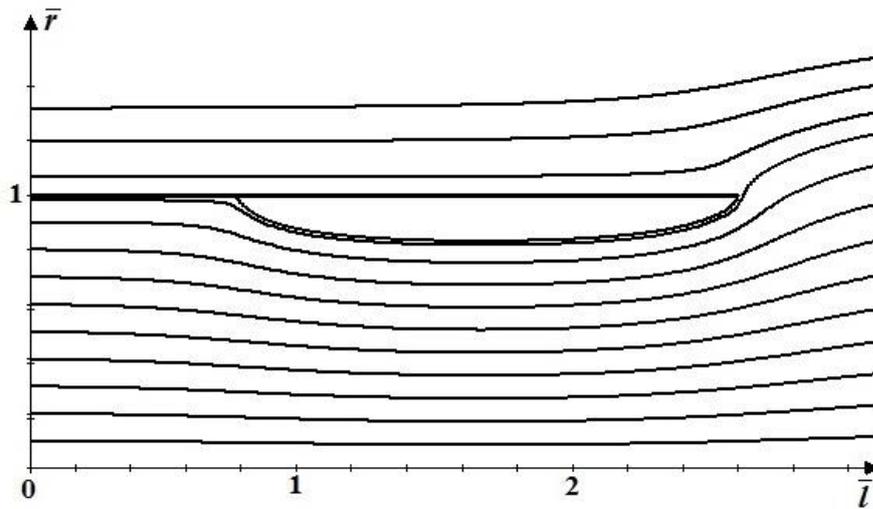


Рисунок 3.14 – Линии тока при скорости набегающего потока $\bar{v}_\infty = -0.5$ м/с

3.3. Моделирование динамики пылевого аэрозоля

вблизи тонкостенного отсоса-раструба при наличии набегающего потока

Целью параграфа является разработка математической модели, вычислительного алгоритма ее реализации для расчета отрывного воздушного течения вблизи отсоса-раструба при набегании на него потока воздуха параллельно

оси отсоса, а также определение зависимости коэффициента аспирации от размеров раструба в ряде характерных случаев.

Пусть на отсос-раструб набегающий поток воздуха со скоростью u_∞ (рисунок 3.15 а).

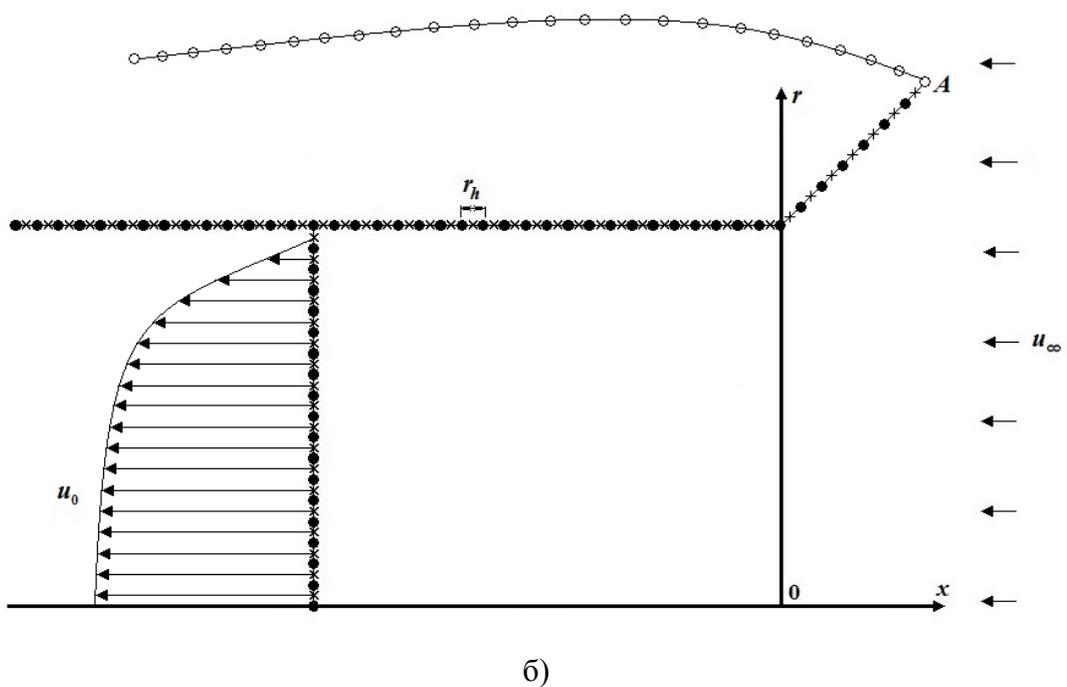
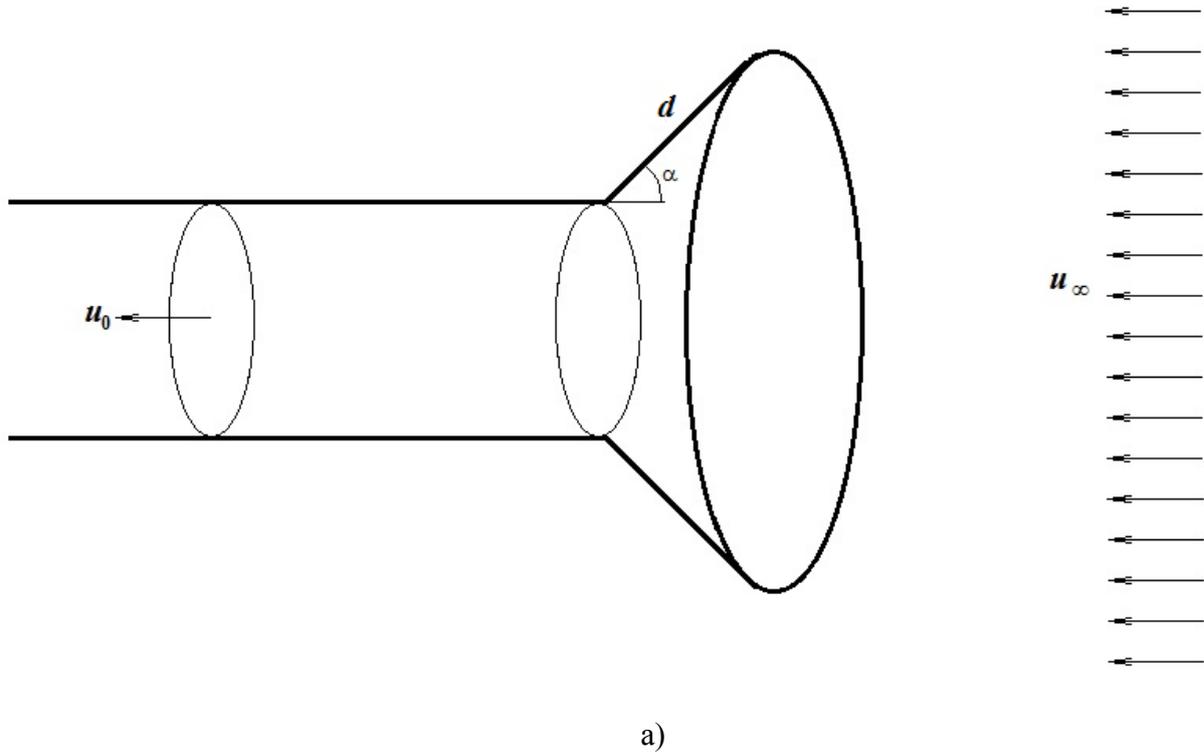


Рисунок 3.15 – Отсос – раструб при набегающем потоке:

а) общая схема течения; б) дискретная модель

Во всасывающем сечении скорость $v = 2u_0(1 - r^2/R^2)$, где R – радиус всасывающего канала. Необходимо выявить закономерности изменения от угла α , длины d и скорости u_∞ коэффициента аспирации $A = (R_c/R)^2 \bar{u}$, где $\bar{u} = u_\infty/u_0$. Заметим, что ускорение силы тяжести направлено противоположно скорости в отсосе u_0 , т.е. отсос - раструб расположен вертикально, но для удобства представления рисунков представлен в горизонтально виде.

Дискретная модель показана на рисунке 3.15, б. Параллельно оси патрубка набегает поток со скоростью v_∞ , которая может быть направлена противоположно оси Ox , а может и совпадать с ней. Свободная поверхность тока может сходиться и внутрь раструба при малых скоростях набегающего потока.

Для построения траекторий пылевых частиц использовалось уравнение (2.7).

При делении уравнения (2.7) на $\frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p$:

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{g} - \frac{3\psi\chi\rho_a}{4d_e\rho_p} |\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a| \cdot (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a).$$

Эквивалентная этому уравнению система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{px} - v_{ax}| (v_{px} - v_{ax}), \\ \frac{dx}{dt} = v_{px}, \\ \frac{dv_{pr}}{dt} = -g - \frac{3\psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{pr} - v_{ar}| (v_{pr} - v_{ar}), \\ \frac{dy}{dt} = v_{pr}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Число Стокса $Stk = \frac{\tau u_\infty}{2R}$, где R – радиус трубы; $\tau = \frac{\rho_p d_e^2}{18\mu}$. Тогда

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p d_e^2 u_\infty}{36\mu R} \Rightarrow \frac{\rho_p d_e^2}{\mu} = \frac{36 \cdot \text{Stk} \cdot R}{u_\infty}.$$

Обозначим $\psi_{\text{st}} = 24 / \text{Re}$.

Тогда (2.8) преобразуется к виду:

$$\psi = \psi_{\text{st}} \cdot \bar{\psi},$$

$$\bar{\psi} = \begin{cases} 1, & \text{Re} < 1, \\ \left(1 + 1/6 \cdot \text{Re}^{2/3}\right), & 1 \leq \text{Re} < 10^3, \\ \left(1 + 0,065 \text{Re}^{2/3}\right)^{1.5}, & \text{Re} \geq 10^3. \end{cases}$$

В этих обозначениях дифференциальное уравнение динамики пылевой частицы имеет вид:

$$\frac{dv_p}{dt} = \mathbf{g} - \frac{\bar{\psi} \chi u_\infty}{2 \cdot \text{Stk} \cdot R} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a), \quad (3.3)$$

которое соответствует системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{\bar{\psi} \chi u_\infty}{2 \cdot \text{Stk} \cdot R} (v_{px} - v_{ax}), \\ \frac{dx}{dt} = v_{px}, \\ \frac{dv_{py}}{dt} = -g - \frac{\bar{\psi} \chi u_\infty}{2 \cdot \text{Stk} \cdot R} (v_{py} - v_{ay}), \\ \frac{dy}{dt} = v_{py}. \end{cases} \quad (3.4)$$

В уравнении (3.3) выделен критерий Стокса, при изменении которого произведены ряд вычислительных экспериментов.

В расчётах были использованы следующие параметры: $u_0 = 1$ м/с; $u_\infty = 0,6$ м/с; шаг дискретности $r_h = 0,000625$ м; радиус трубы $R = 0,1$ м; длина трубы $20R$; всасывающее отверстие расположено по середине трубы; шаг построения поверхности тока $0,0000025$ м; шаг интегрирования дифференциального уравнения динамики пылевой частицы $0,001 - 0,005$; погрешность $\varepsilon = 10^{-6}$.

Предельные траектории частиц пыли с числами $Stk = 0,01$ и $Stk = 0,001$ практически накладываются друг на друга. Сплошной линией обозначена граница отрыва потока (рисунок 3.16). С увеличением числа Стокса Stk область аспирации увеличивается. Расчёт вёлся при $u_0 = 1$ м/с.

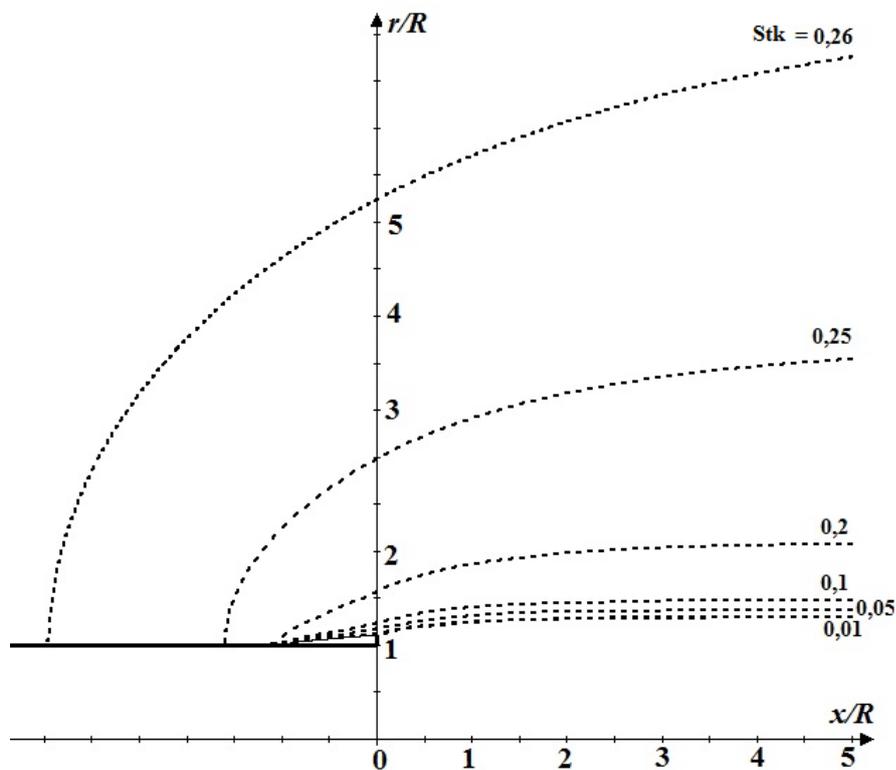


Рисунок 3.16 – Предельные траектории пылевых частиц при: $d/R = 0,1$ $\bar{u} = 0,6$.

Начальные условия для построения траекторий пылевых частиц задавались следующим образом: $v_{px} = -u_\infty$, $v_{pr} = 0$, $x = 30R$. Задавалось число Стокса, начальное положение пылевой частицы, определялось время релаксации. Предельные траектории строились аналогично их построению для круглого патрубка (п.3.1.2).

Из рисунка 3.17 видно, что предельные траектории могут и не заканчиваться на границе раструба. Это объясняется наличием точки разветвления пылевых частиц, что демонстрируется рисунком 3.18, где изображены траектории пылевой частицы чуть ниже и чуть выше предельной. Предельные траектории пылевых частиц сжимаются к оси симметрии раструба в сравнении с рисунком 3.16.

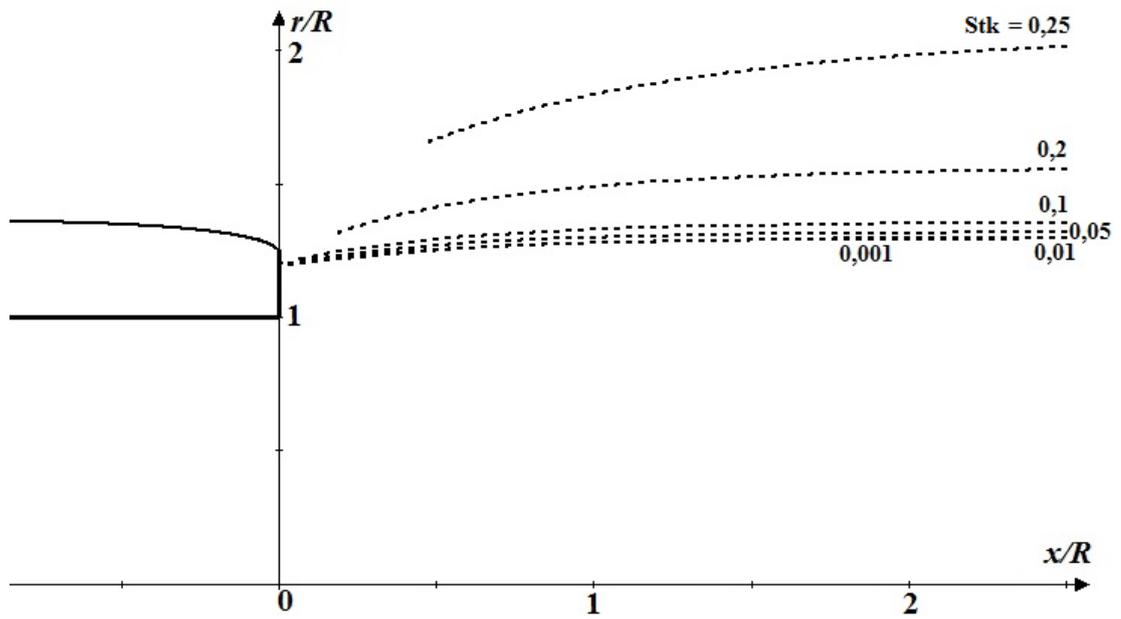


Рисунок 3.17 – Предельные траектории частиц пыли при $d/R = 0,25$, $\bar{u} = 0,6$

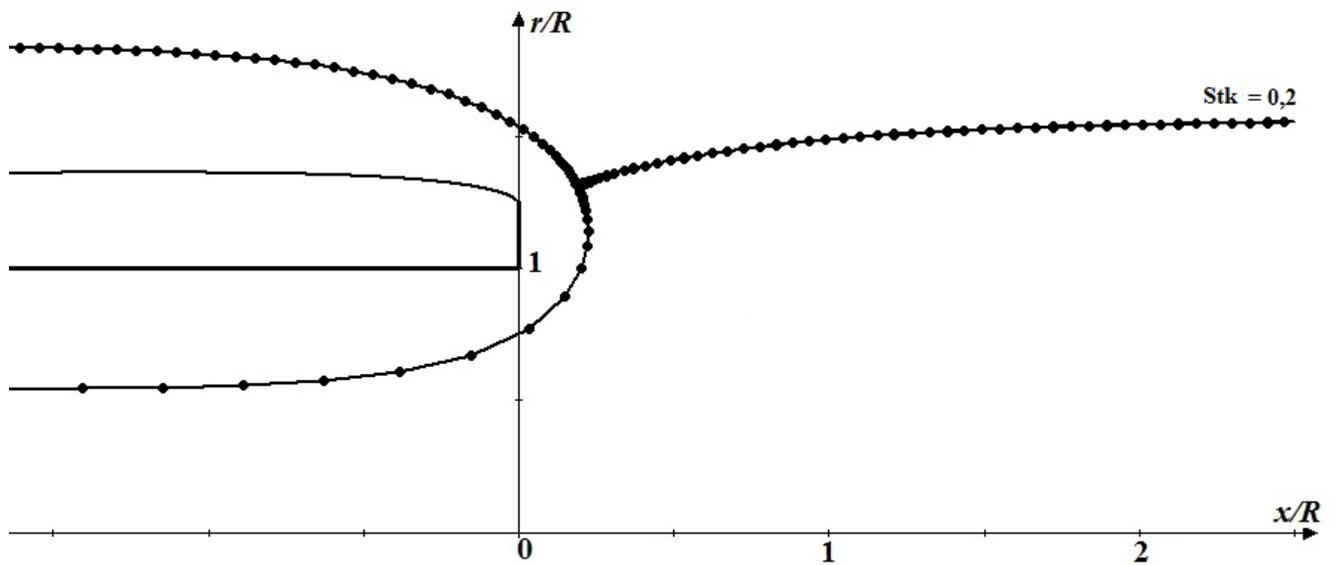


Рисунок 3.18 – Траектории пылевой частицы при: $Stk = 0,2$, $d/R = 0,25$, $\bar{u} = 0,6$

На рисунках 3.19, 3.20 точка A – это точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы при $Stk = 0,01$; B – $Stk = 0,05$; C – $Stk = 0,1$; D – $Stk = 0,2$.

На рисунке 3.21 точка A – это точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы при $Stk = 0,001$; B - $Stk = 0,01$; C - $Stk = 0,05$; D – $Stk = 0,1$.

Из рисунков 3.16-3.21 видно, что предельные траектории пылевых частиц при фиксированной скорости в отсосе и скорости набегающего потока, при увеличении длины раструба с углом раскрытия $\alpha = 90^\circ$ приближаются к оси отсоса, вплоть до чисел $Stk = 0,2; 0,25$, где предельных траекторий не существует (рисунок 3.21). Соответственно, коэффициент аспирации для таких частиц будет равен нулю.

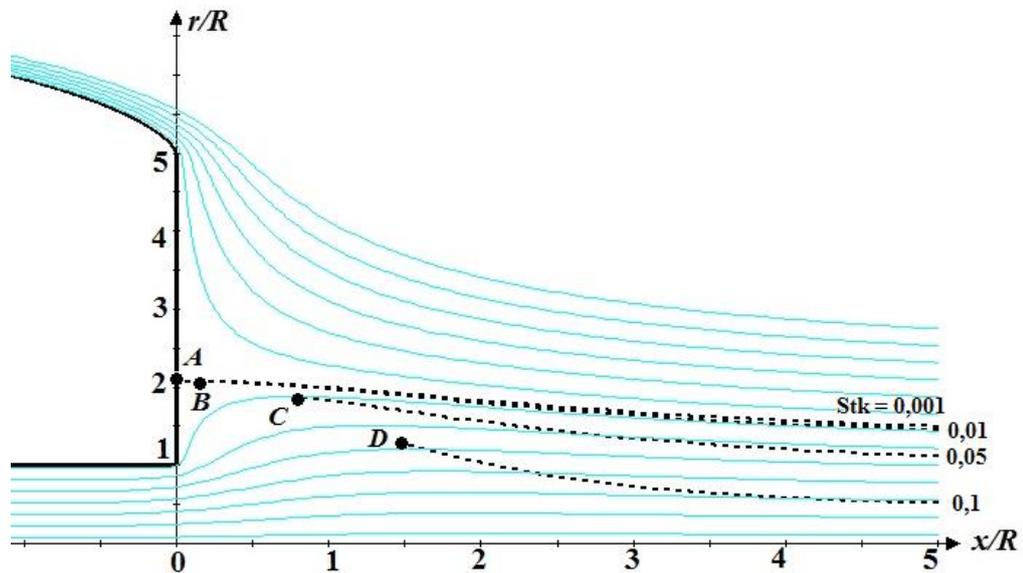


Рисунок 3.21 – Линии тока и траектории пылевых частиц при $d/R = 4$, $\bar{u} = 0,6$

Начальное расстояние частиц составляло расстояния $30R$ от раструба. Графики зависимости коэффициента A от длины d раструба, при $\alpha = 90^\circ$ представлены на рисунке 3.22. При $Stk \rightarrow 0$ коэффициент аспирации $A \rightarrow 1$ при разных длинах d раструба. Это объясняется тем, что при $Stk \rightarrow 0$ предельные траектории частиц пыли приближаются к критическим линиям тока. При увеличении числа Stk коэффициент A уменьшается при росте величины d . При $Stk = 0,2$ заметно резкое снижение коэффициента A при изменении длины d от 0 до 1 калибра. Здесь все линии пересекаются в точке, соответствующей длине $d = 0,5R$.

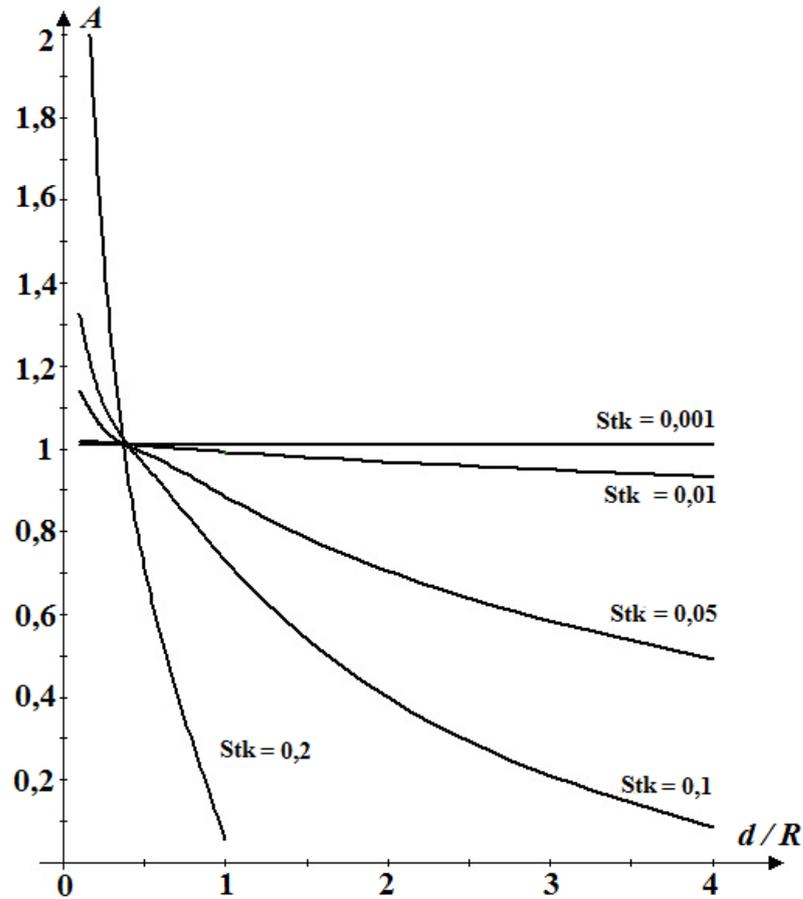


Рисунок 3.22 – Зависимости $A(d)$ при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 0,6$

При росте скорости \bar{u} в два раза, зависимость коэффициента A от величины d/R значительно изменяется (рисунок 3.23). При числах $Stk < 0,1$ коэффициент A приближается к 1 при всех рассмотренных длинах d , но характер изменения этого коэффициента прежний – он уменьшается при росте d и не превосходит 1. Здесь скорость \bar{u} была выше, поэтому построены графики изменений коэффициента A при росте числа Stk до 1.

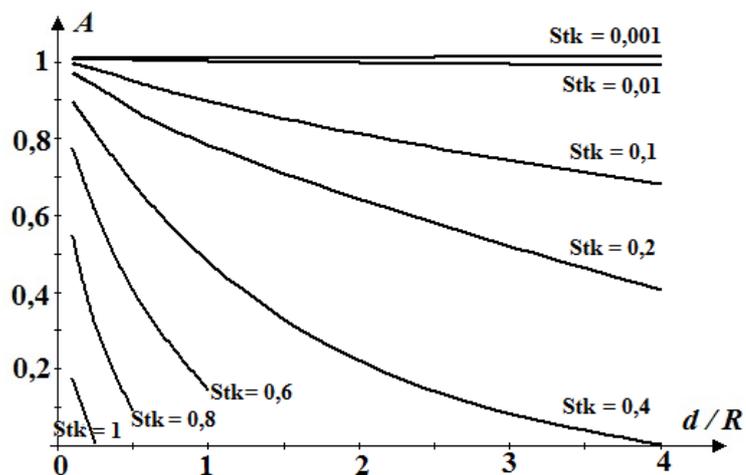


Рисунок 3.23 – Зависимости $A(d)$ при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 1,2$

Зависимости $A = f(\alpha)$ при фиксированной длине d представлены на рисунках 3.24-3.25.

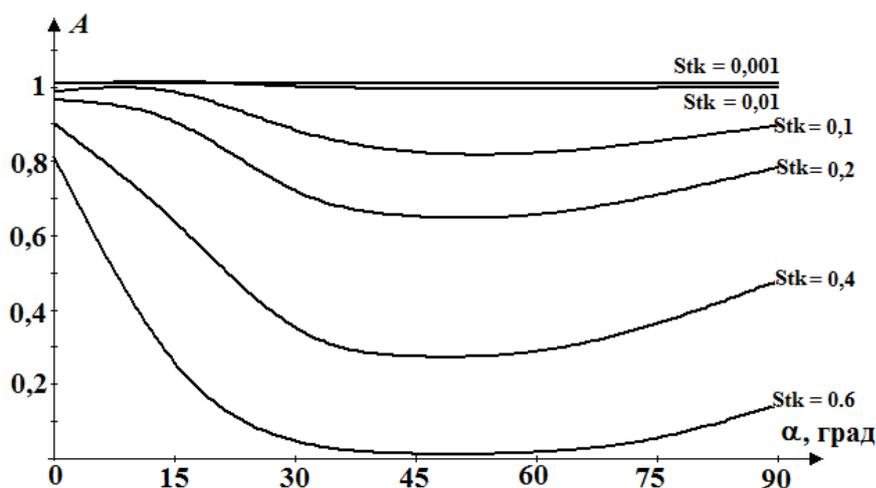


Рисунок 3.24 – Зависимости $A(\alpha)$ при $d/R = 1$, $\bar{u} = 1,2$

При малых числах Stk коэффициент A также близок к 1. Графики функций не монотонны, существует минимум $\alpha = 45^\circ - 60^\circ$, объясняющийся ростом тормозящего эффекта при увеличении угла наклона раструба, сменяющимся при дальнейшем его увеличении влиянием радиальной составляющей скорости, увлекающим частицу пыли в раструб.

При снижении величины \bar{u} в 6 раз изменение коэффициента A от угла α изменяется (рисунок 3.25). При увеличении α величина A падает. Происходит смена режима отрыва потока (см. рисунок 3.26).

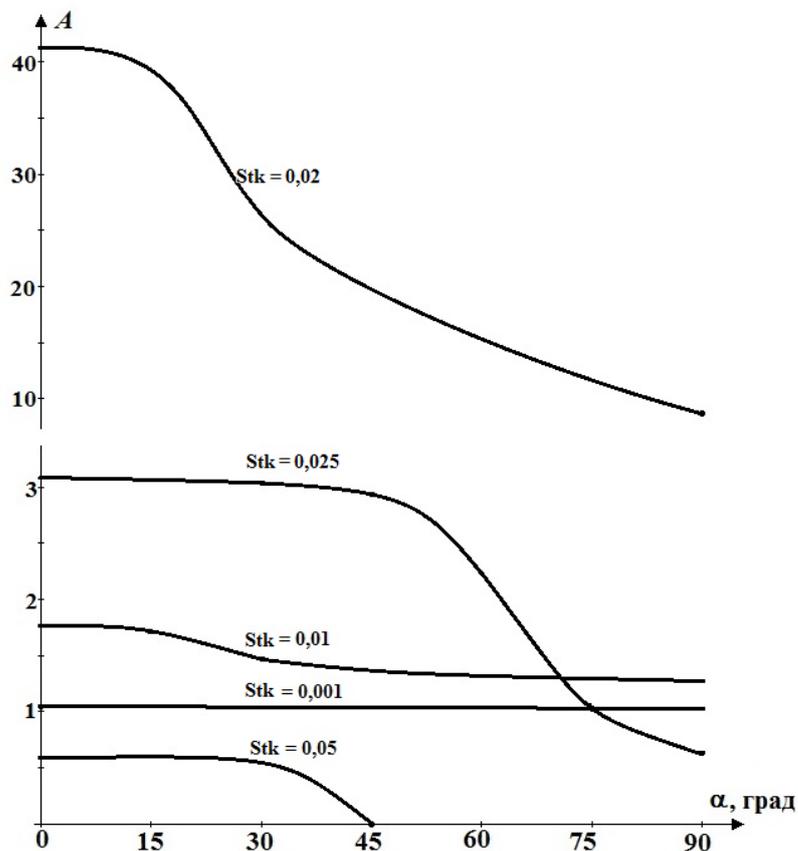


Рисунок 3.25 – Зависимости $A(\alpha)$ при $d = R$, $\bar{u} = 0,2$

При углах наклона раструба до 30 градусов, отрыв потока происходит внутрь раструба (рисунок 3.26 а-б), при больших углах отрыв потока происходит вне раструба (рисунок 3.26 в-е). Пылевые частицы улавливаемые раструбом могут находиться не только во внешнем набегающем потоке. Существуют пылевые частицы, которые не уносятся внешним набегающим потоком, они осаждаются, но улавливаются отсосом-раструбом. На рисунке 3.26 это частицы с числами Стокса больше 0,25. В этом случае коэффициент аспирации рассчитывается по формуле:
$$A = \frac{R_c^2 - R^2}{R^2} \frac{u_\infty}{u_0}.$$

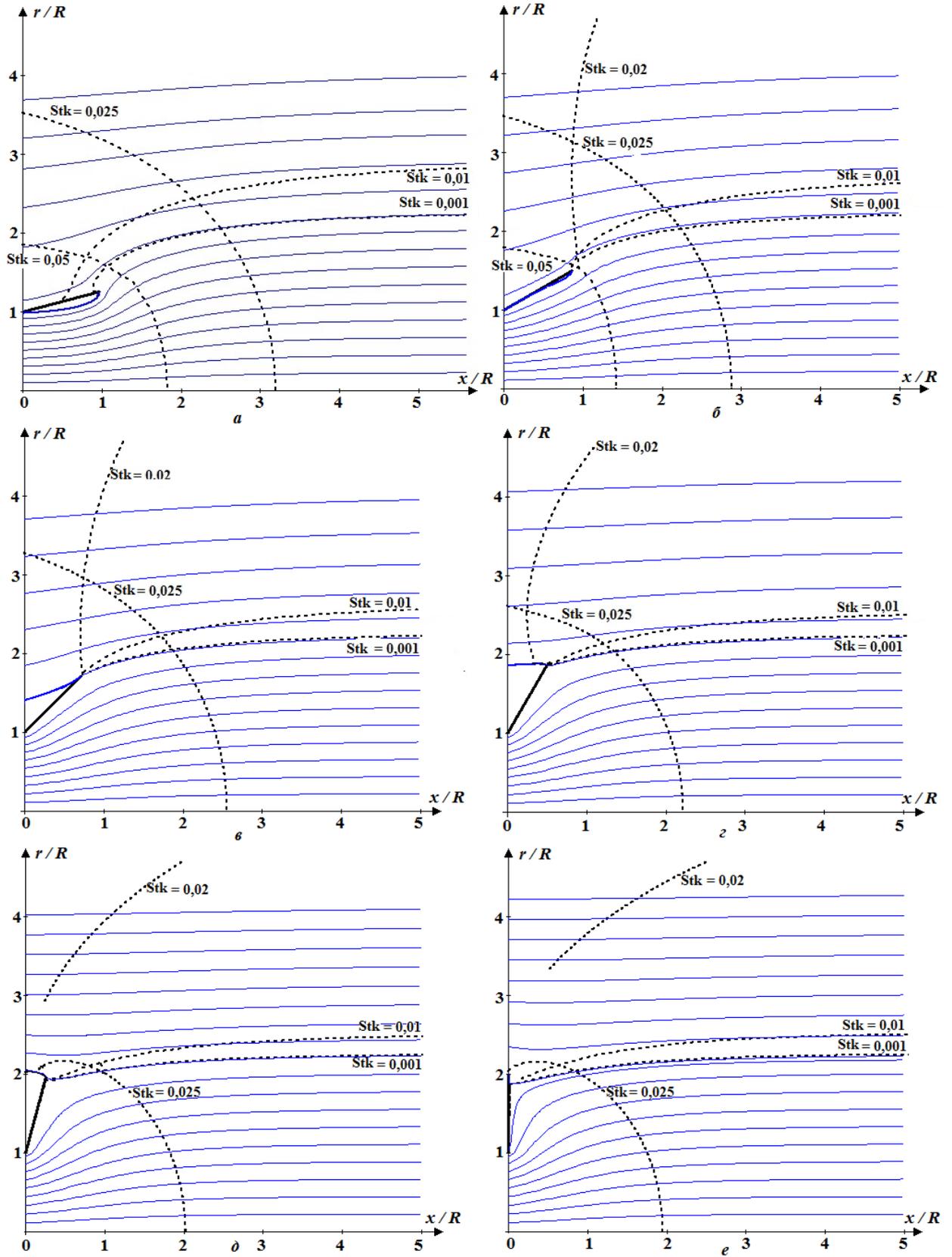


Рисунок 3.26 – Линии тока и траектории частиц пыли при $d = R$, $\bar{u} = 0,2$ при разных углах наклона раструба: *a* - $\alpha = 15^\circ$; *b* - $\alpha = 30^\circ$; *c* - $\alpha = 45^\circ$; *d* - $\alpha = 60^\circ$; *e* - $\alpha = 90^\circ$;

Пылевые частицы с числом Стокса равным 0,5 улавливаются только при значении угла наклона раструба до 30 градусов (рисунок 3.26 *а-б*). При дальнейшем увеличении угла они осаждаются. Осаждаются и пылевые частицы с большими числами Стокса.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Усовершенствованный метод расчета отрывного воздушного течения вблизи всасывающего патрубка при наличии набегающего потока позволяет строить адекватное поле скоростей воздушного потока, предельные траектории пылевых частиц и определять коэффициент аспирации.

2. При помощи метода расчета отрывного воздушного течения на входе во всасывающий патрубок с учётом набегающего потока, определены характерные размеры отрывной области при разных величинах скорости и направления внешнего набегающего потока.

3. Разработан метод расчета отрывного воздушного течения вблизи отсоса-раструба с учётом набегающего потока. При помощи разработанной программы определено поле скоростей воздуха и траектории частиц пыли, определены коэффициенты аспирации при разных числах Стокса, размерах раструбов, скорости набегающего потока,

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ КРУГЛЫХ ОТСОСОВ - РАСТРУБОВ

4.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка по исследованию отрывных потоков на входе в отсосы-раструбы (рисунок 4.1) состояла: из двух вентиляторов 1 и 2 (ЕХ-18 4с Systemair и ВКМц 150 Вентс), последовательно соединённых; пластикового воздуховода 3 диаметром 0,125 м, соединённого при помощи коллектора 4 диаметром 0,112 м, выполненного по лемнискате Бернулли, с камерой статического давления.

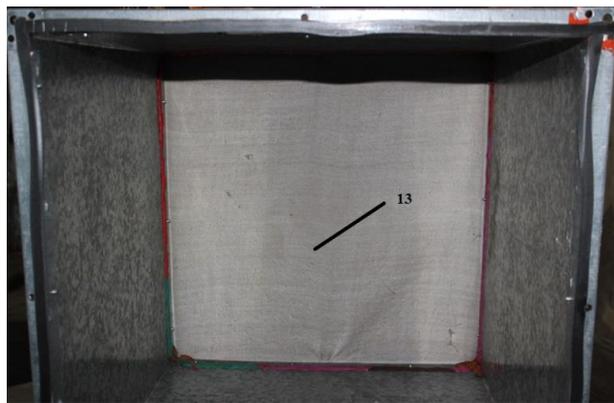


а) первая часть экспериментальной установки: 1 – вентилятор ЕХ-18 4с Systemair; 2 – вентилятор ВКМц 150 Вентс; 3 – пластиковый воздуховод; 4 – коллектор; 5 – деревянный щит; 6 - термоанемометром testo-435

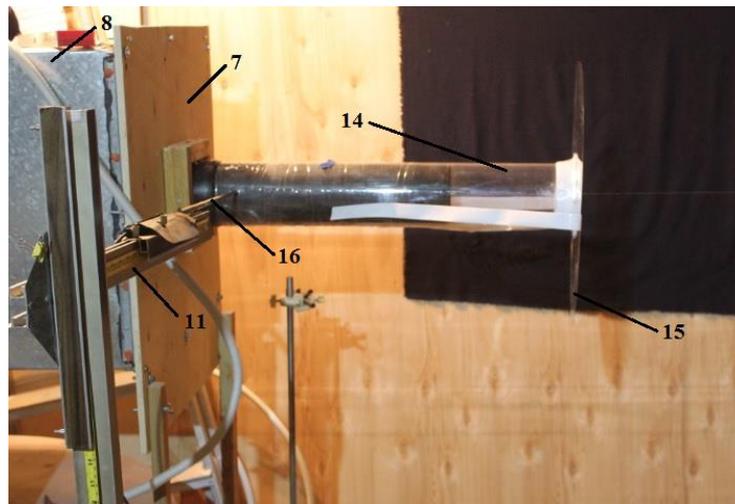
Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка
(начало)



б) вторая часть экспериментальной установки: 5, 7 – деревянные щиты; 8 – камера статического давления; 9 – увлажнитель воздуха Polaris; 10 – пластиковая трубка; 11 – штатив; 12 – пластиковая труба

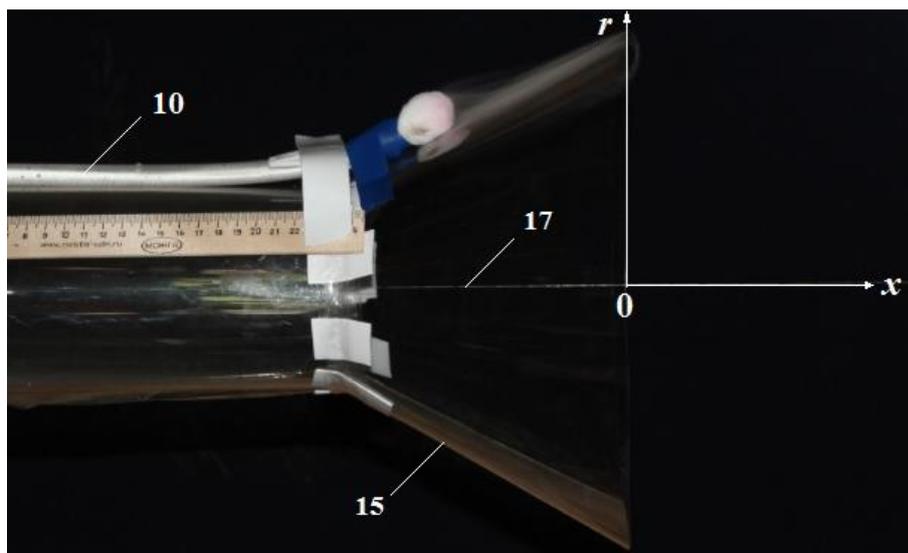


в) внутренняя часть камеры статического давления: 13 – фильтровальная ткань



г) вторая часть экспериментальной установки: 14 – прозрачная труба; 15 – раструб;
16 – телескопическая трубка термоанемометра

Рисунок 4.1 - Продолжение



д) отсос-раструб: 15 – раструб; 17 - леска

Рисунок 4.1 – Окончание

Камера статического давления 8 закреплена между деревянными щитами 5 и 7, опирающимися на пол при помощи деревянных стоек (рисунок 4.1а, б). Камера статического давления 8 изготовлена из оцинкованного листового железа и состояла из двух частей шириной и высотой равной 0,5м и длиной 0,55м. Две части скреплялись болтами и разделены плотной фильтровальной тканью 13 (рисунок 4.1 в) для сглаживания пульсаций скорости воздуха.

В центре щита 7 вырезано круглое отверстие, где укреплена пластиковая труба 12 с внутренним диаметром 100 мм и накрученной на неё из прозрачного листа ПЭТ-А Novattro толщиной 0,5 мм трубы 14 диаметром 112 мм (рисунок 4.1 г). На неё впоследствии приклеивались с помощью скотчей различные раструбы 15 (рисунок 4.1 г, д), выполненные из листов ПЭТ толщинами 0,5-0,7 мм.

Для визуализации потока использовался увлажнитель воздуха 9 Polaris, генерирующий с помощью ультразвуковой мембраны холодный пар (водную пыль), поступающий на испытуемый раструб по трубке 10 (рисунок 4.1 б, д).

Поле скоростей измерялось термоанемометром 6 (testo-435) с погрешностью $\pm(0,03 + 0,05 \cdot \text{замеряемая величина скорости})$, м/с. Величина скорости усреднялась в интервале времени от 30 до 60 сек. (60 - 120 измерений в точке).

Штатив 11 (рисунок 4.1 б, г) был оснащён измерительной шкалой, позволяющей перемещать зонд, укреплённый на телескопической трубке 16 термоанемометра, на заданное расстояние по вертикали. Для удобства измерений в центре трубы по ее оси натянута леска 17, проградуированная через два сантиметра. Система координат была цилиндрической, ось OX располагалась по оси трубы, начало координат совпадало со входом в трубу (или в дальнейшем в раструб), вторая координата – расстояние r от OX (рисунок 4.1 д).

Максимальная скорость внутри чёрной трубы 12 (рисунок 4.1 обозначалась v_{\max}). Средняя скорость внутри трубы, следуя монографии [37], $v_0 = kv_{\max}$. Заметим, что коэффициент $k = 0,816$ принятый в этой формуле практически совпадает с расчётами, приведёнными в учебниках [118,119] для гладких труб при температуре 20°C и скорости порядка 10 м/с, $Re = 66\,400$ и коэффициенте гидравлического трения $\lambda = 0,3164Re^{0,25} \approx 0,02$.

Целью экспериментов было определение поля скоростей воздушных течений в спектре действия отсоса-раструба, размеров отрывной области на входе в раструб, а также определение достоверности и адекватности результатов расчета по разработанному при помощи метода дискретных вихрей вычислительному алгоритму (главы 2 – 3).

Геометрические размеры на представленных рисунках 4.2 – 4.44 отнесены к радиусу трубы $R = 5,6$ см, значения скорости отнесены к средней величине скорости внутри трубы. В таблицах В.1 – В.14 (приложение В) сведены результаты экспериментального определения поля скоростей в отсосы – раструбы. На рисунках, где приведены профили составляющих скорости, черными кружочками изображены экспериментальные значения, сплошной линией – расчёты по разработанной компьютерной программе (алгоритм изложен в главе 3, здесь $v_\infty = 0$). На рисунках с изображением отрыва потока после фото показана расчётная кривая по той же программе. Размеры отрывной области $a, b, l, a_0, r_e, \delta_\infty$ соответствуют рисунку 3.1 предыдущей главы и также отнесены к радиусу всасывающей трубы.

4.2. Круглая всасывающая труба

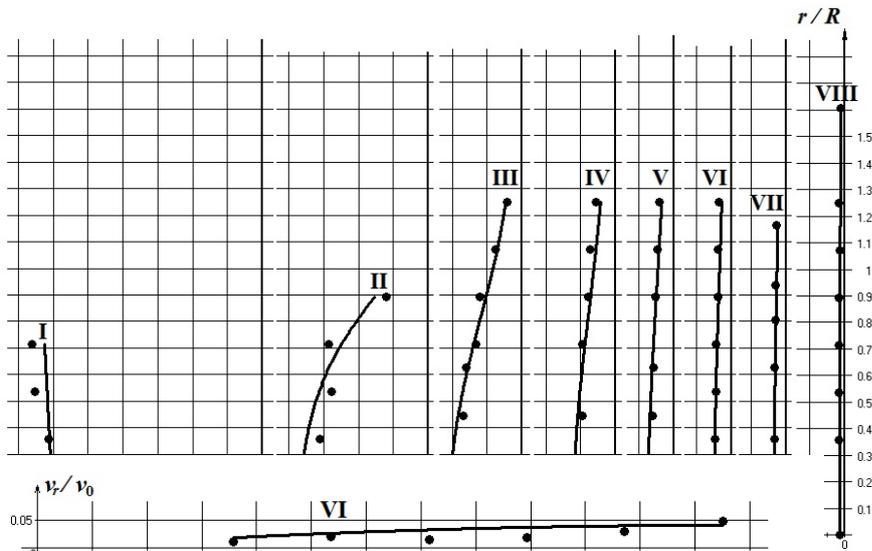


Рисунок 4.2 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи круглой всасывающей трубы: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0.357$; III - $x/R = 0.714$; IV - $x/R = 1.071$; V - $x/R = 1.429$; VI - $x/R = 1.786$; VII - $x/R = 2.143$; VIII - $x/R = 3.214$

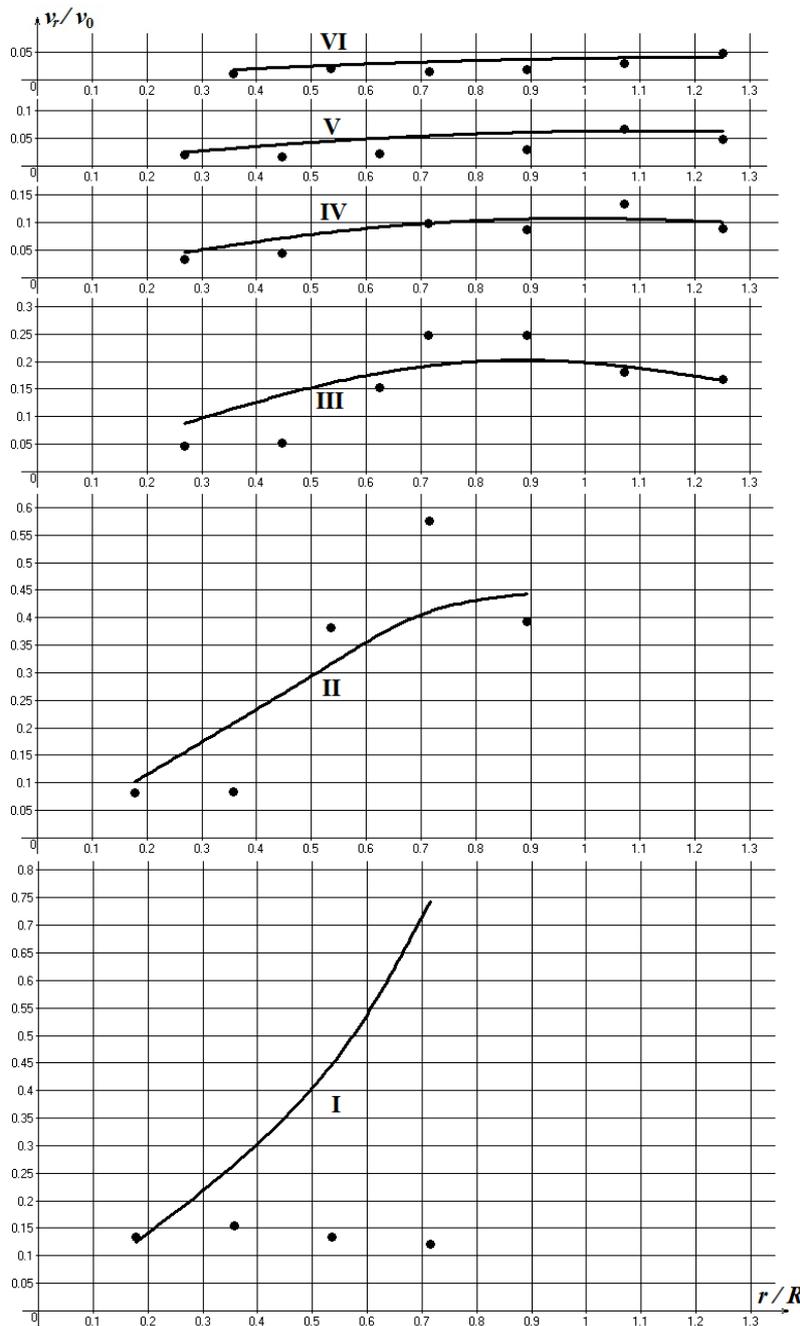


Рисунок 4.3 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной скорости вблизи круглой всасывающей трубы: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0.357$; III - $x/R = 0.714$; IV - $x/R = 1.0714$; V - $x/R = 1.42857$; VI - $x/R = 1.7857$

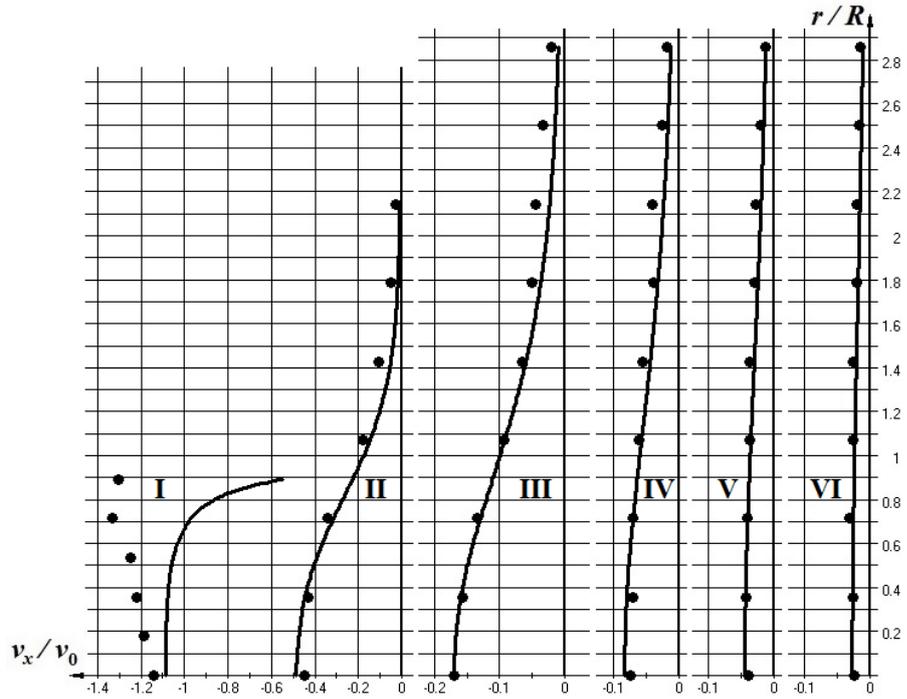


Рисунок 4.4 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи круглой всасывающей трубы: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0.089$;
 III - $x/R = 0.625$; IV - $x/R = 1.339$; V - $x/R = 1.964$; VI - $x/R = 2.679$

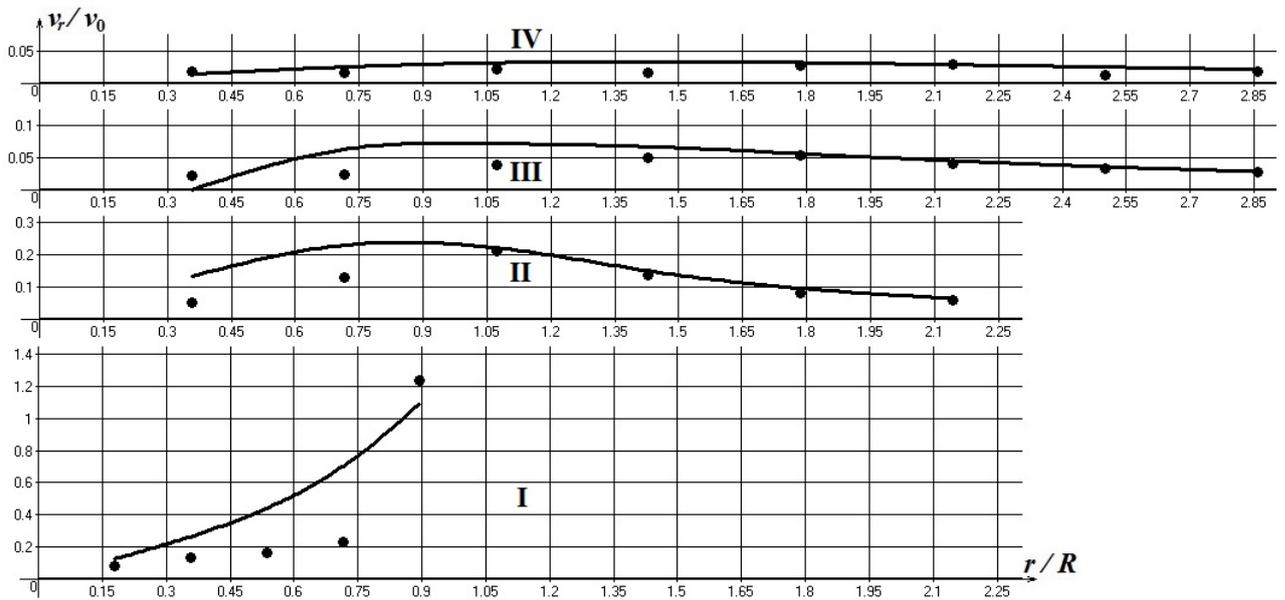


Рисунок 4.5 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи круглой всасывающей трубы: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0.089$;
 III - $x/R = 0.625$; IV - $x/R = 1.339$

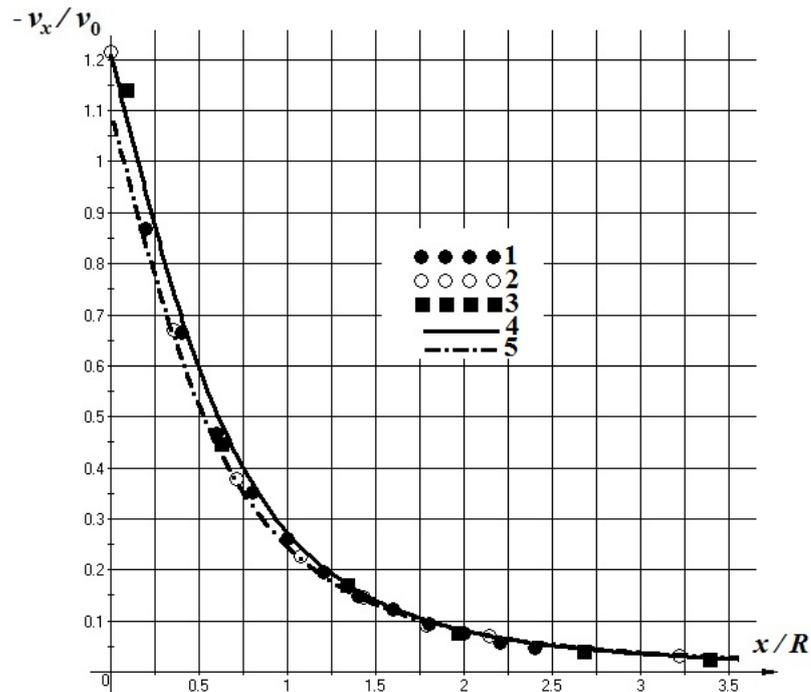


Рисунок 4.6 – Сравнение величин безразмерной осевой скорости: 1 – экспериментальные данные Alden, J.L [95]; 2 – эксперимент при работе одного вентилятора; 3 – эксперимент при работе двух вентиляторов; 4- расчётная кривая по МДВ; 5 – расчёт по формуле В.Н. Посохина

[1-2]

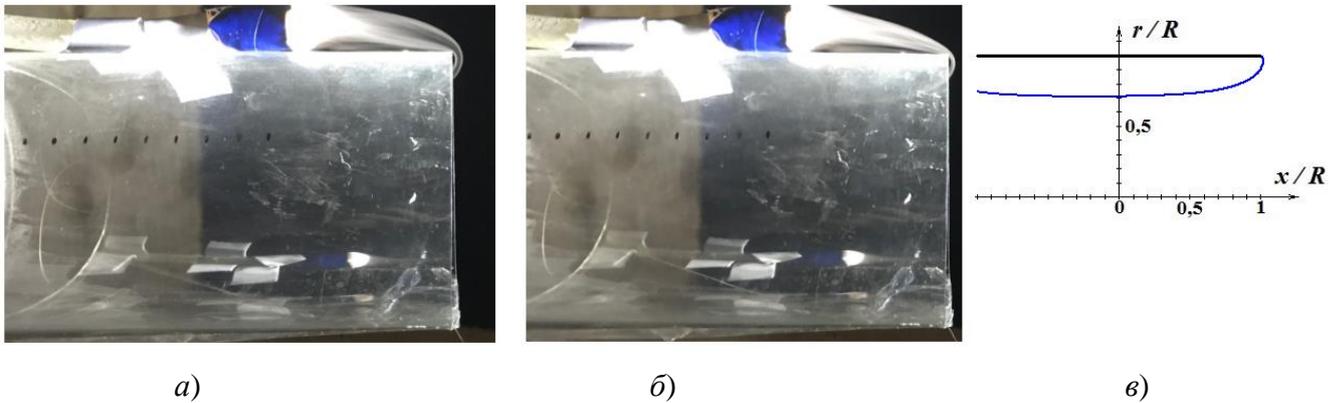


Рисунок 4.7 – Отрывная область в круглой всасывающей трубе

а) $a_0 = 0,023$; $r_e = 0,85$; $b = 0,35$; б) $a_0 = 0,023$; $r_e = 0,83$; $b = 0,35$;

в) $a_0 = 0,018$; $r_e = 0,906$; $b = 0,29$

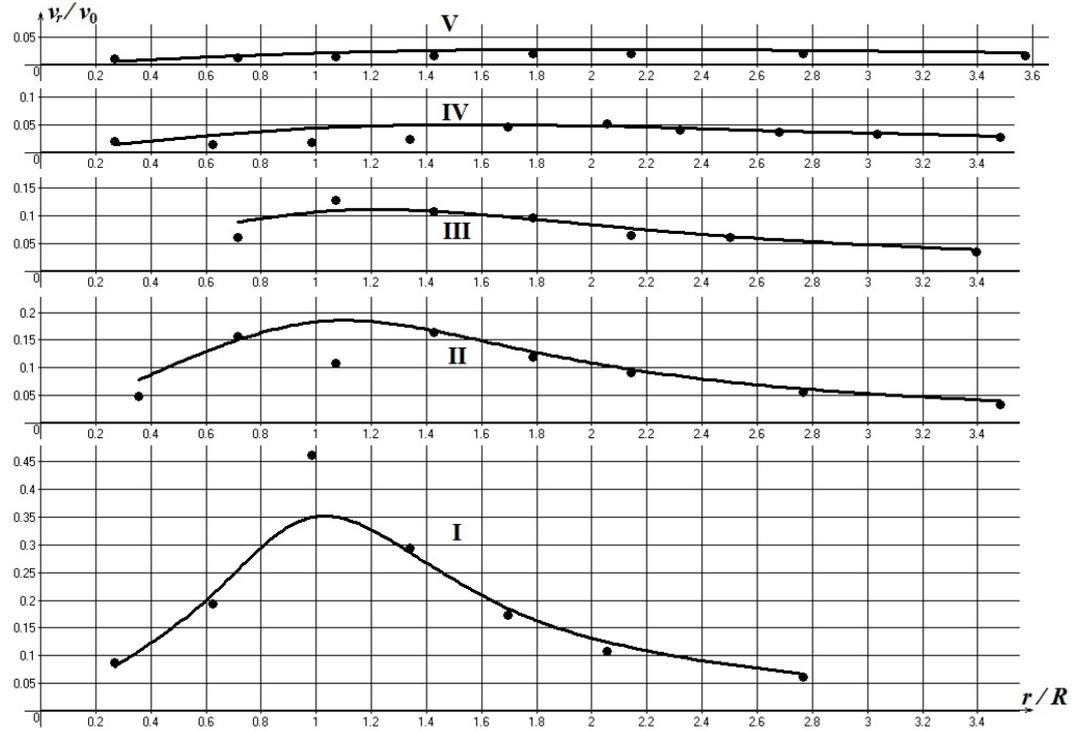


Рисунок 4.10 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной в 5 калибров: I - $x/R = 0,357$; II - $x/R = 0,714$; III - $x/R = 1,0714$; IV - $x/R = 1,786$; V - $x/R = 2,5$; VI - $x/R = 3,214$



Рисунок 4.11 – Отрывная область на входе в раструб 5 калибров с углом наклона 60° : а) $b = 0.7$, $a_0 = 0.063$, $l = 0.80$, $r_e = 3.29$; б) $b = 0.8$, $a_0 = 0.071$, $l = 0.98$, $a = 2.55$; $r_e = 3.8$; в) $b = 0.51$, $a_0 = 0.064$, $l = 0.44$, $a = 1.95$; $r_e = 3.96$; г) $b = 0.47$, $a_0 = 0.052$, $l = 0.58$, $a = 2.91$; $r_e = 4.43$

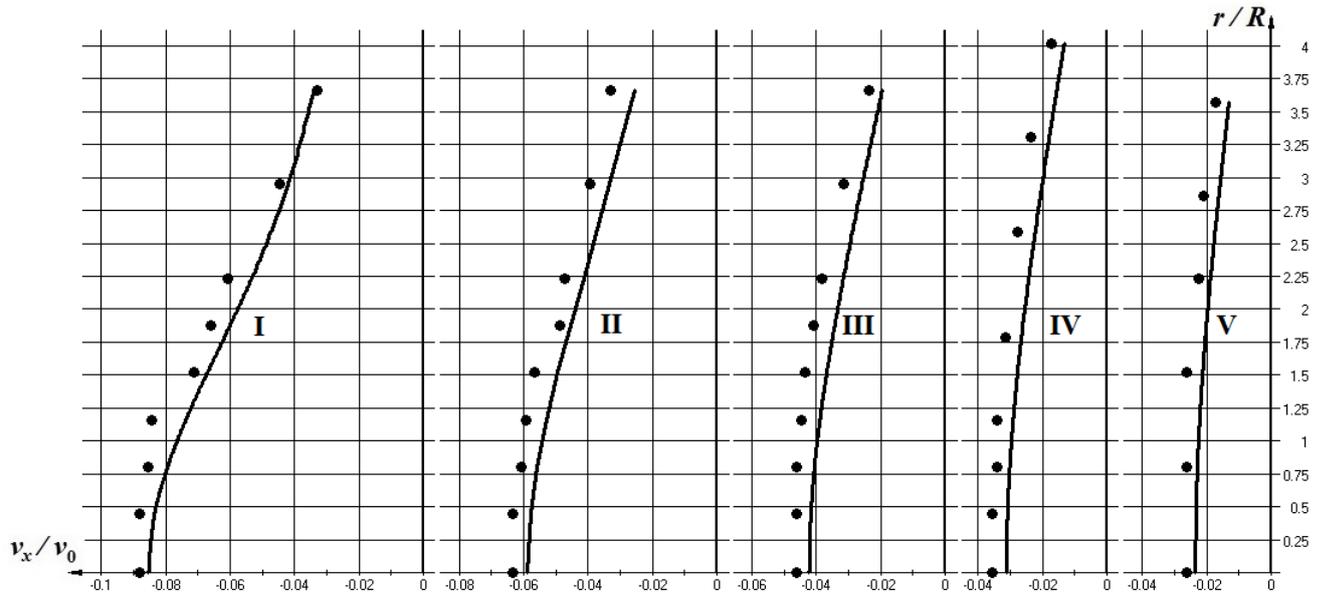


Рисунок 4.12 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной в 5 калибров: I - $x/R = 0,357$; II - $x/R = 0,893$; III - $x/R = 1,786$; IV - $x/R = 2,5$; V - $x/R = 3,214$

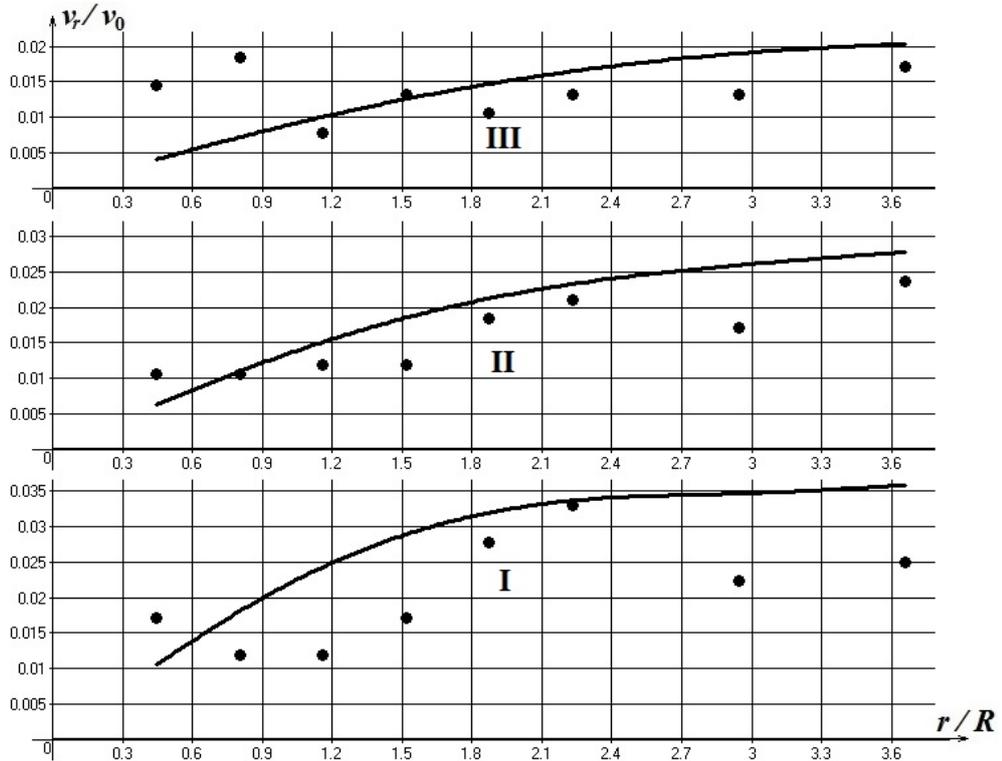


Рисунок 4.13 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной в 5 калибров: I - $x/R = 0,357$; II - $x/R = 0,893$; III - $x/R = 1,786$

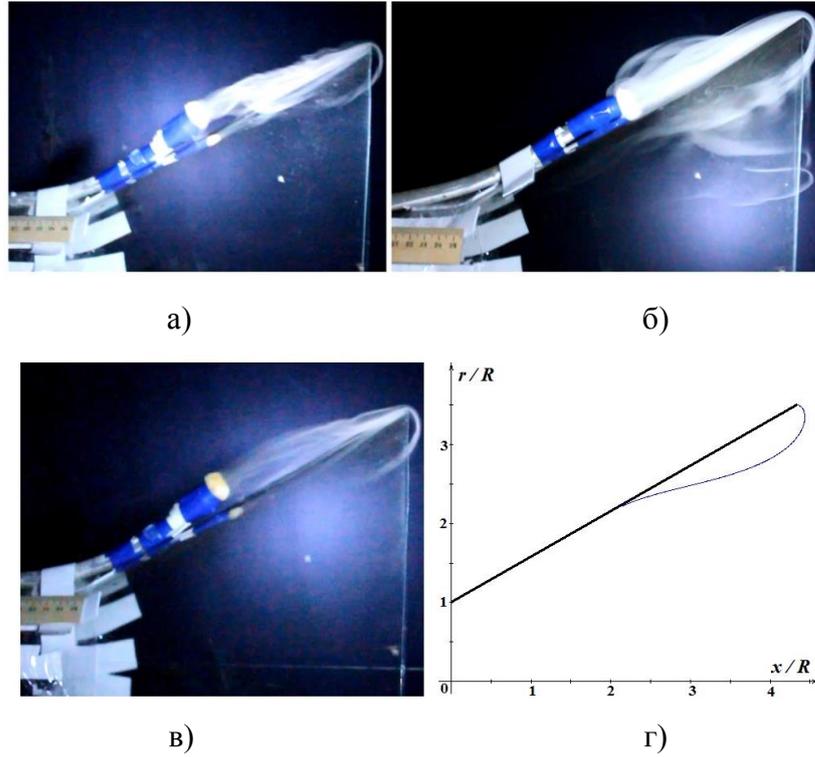


Рисунок 4.14 – Отрывная область на входе в раструб 5 калибров с углом наклона 30° :
 а) $b = 0.49$, $a_0 = 0.053$, $l = 0.42$, $a = 2.12$; $r_e = 2.89$; б) $b = 0.43$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.51$, $a = 1.9$;
 $r_e = 2.79$; в) $b = 0.52$, $a_0 = 0.051$, $l = 0.64$, $a = 2.77$; $r_e = 3.96$; г) $b = 0.42$, $a_0 = 0.043$, $l = 0.59$,
 $a = 2.99$; $r_e = 3.08$

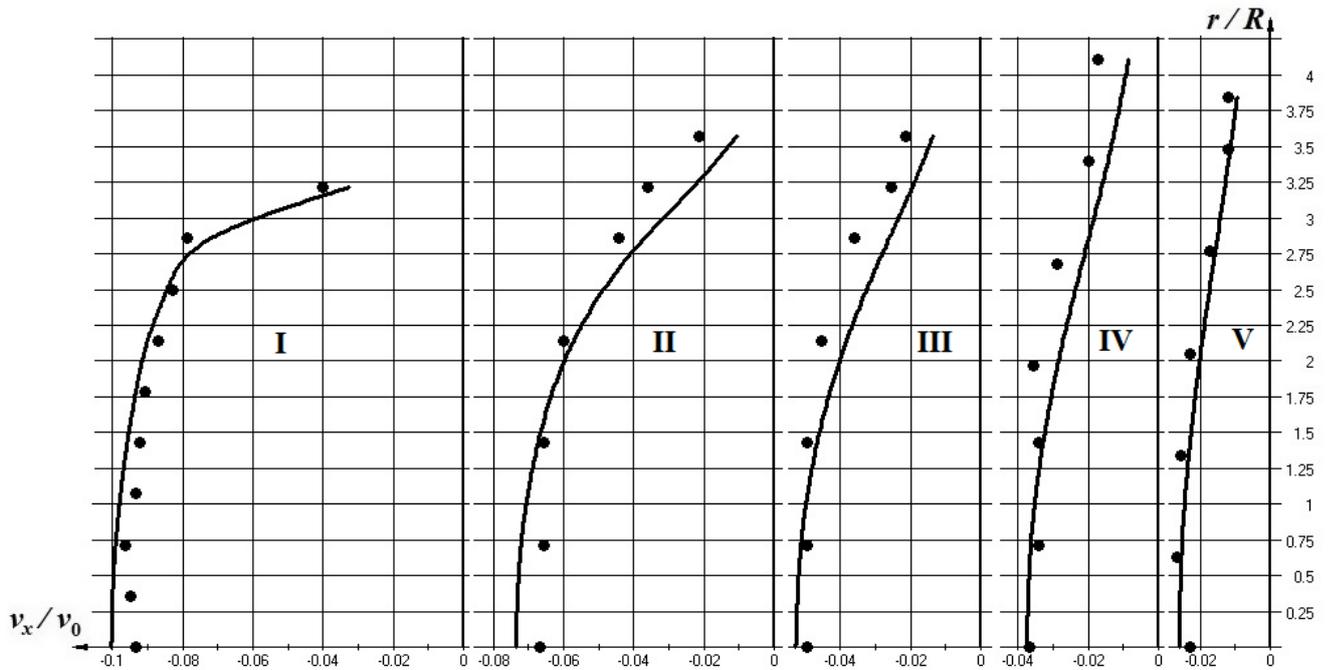


Рисунок 4.15 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной в 5 калибров: I - $x/R = 0.268$; II - $x/R = 0.982$;
 III - $x/R = 1.696$; IV - $x/R = 2.411$; V - $x/R = 3.214$

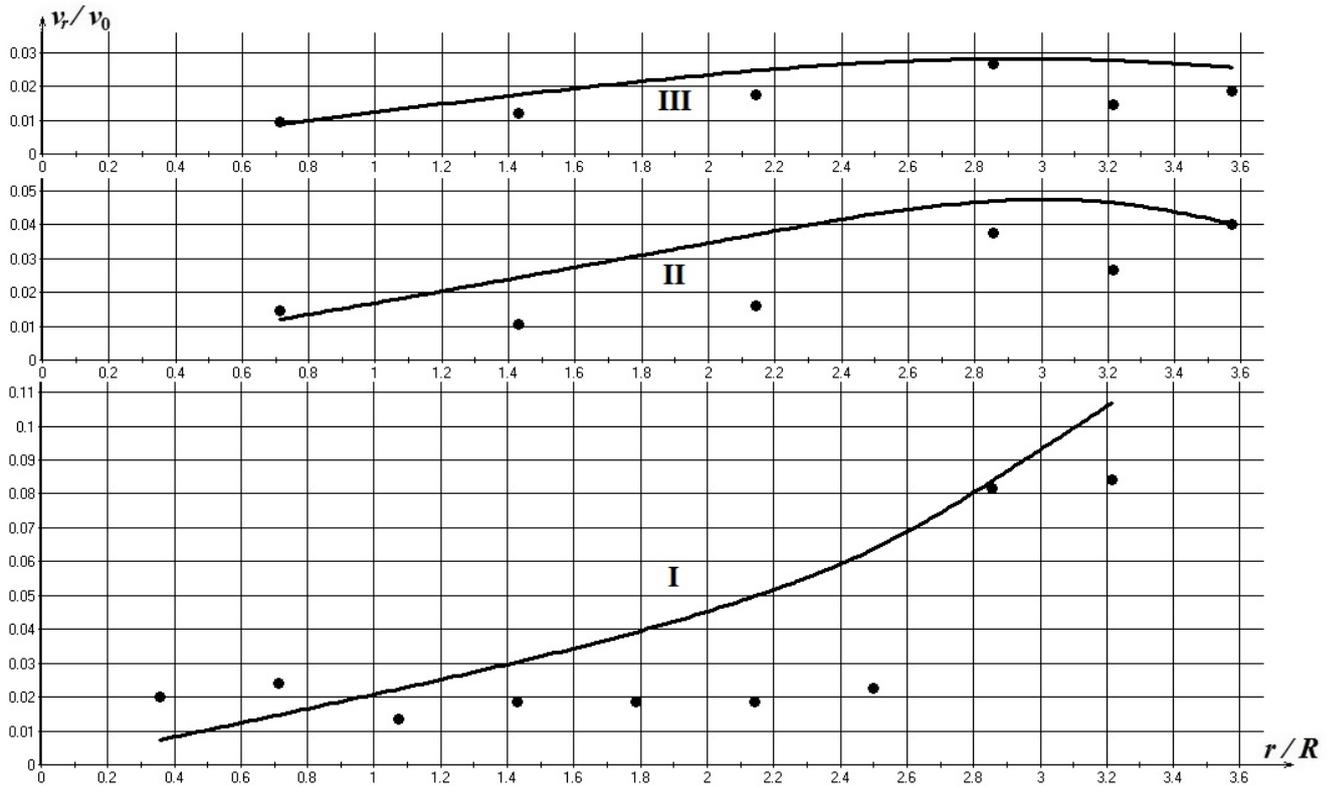


Рисунок 4.16 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной 5 калибров:

I - $x/R = 0.268$; II - $x/R = 0.982$; III - $x/R = 1.696$

4.4. Отсос-раструб длиной в три калибра

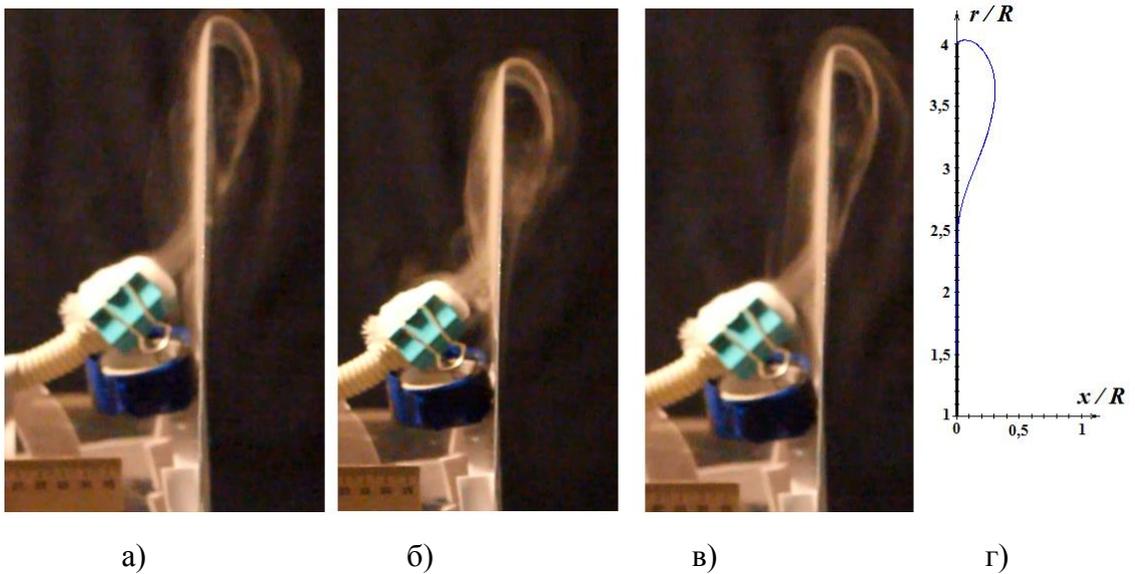


Рисунок 4.17 – Отрывная область на входе в раструб 5 калибров с углом наклона 90° :
 а) $b = 0.43$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.52$, $a = 1.64$; б) $b = 0.4$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.51$, $a = 1.62$; в) $b = 0.37$,
 $a_0 = 0.03$, $l = 0.5$, $a = 1.92$; г) $b = 0.31$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.37$, $a = 1.55$

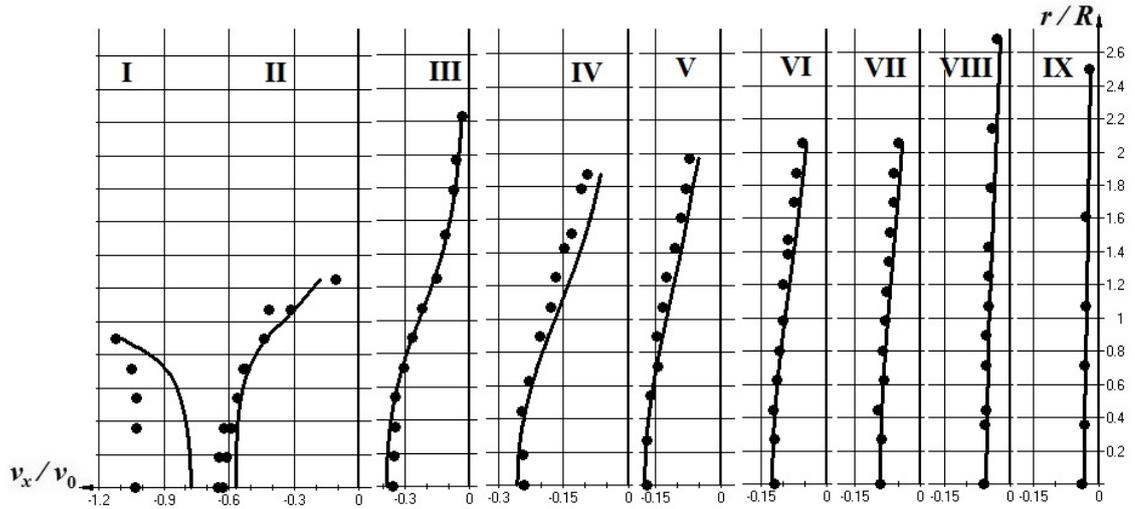


Рисунок 4.18 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной 3 калибра: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0,357$; III - $x/R = 0,714$; IV - $x/R = 1,0714$; V - $x/R = 1,429$; VI - $x/R = 1,785$; VII - $x/R = 2,143$; VIII - $x/R = 2,857$; IX - $x/R = 3,75$

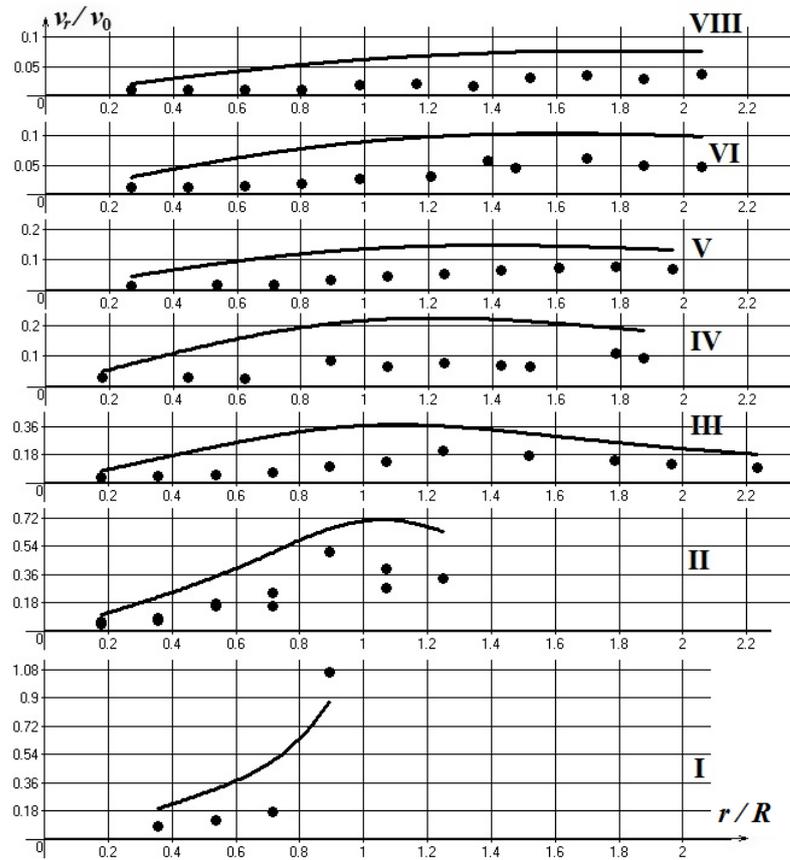


Рисунок 4.19 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной 3 калибра: I - $x/R = 0$; II - $x/R = 0,357$; III - $x/R = 0,714$; IV - $x/R = 1,0714$; V - $x/R = 1,429$; VI - $x/R = 1,785$; VII - $x/R = 2,143$; VIII - $x/R = 2,857$; IX - $x/R = 3,75$

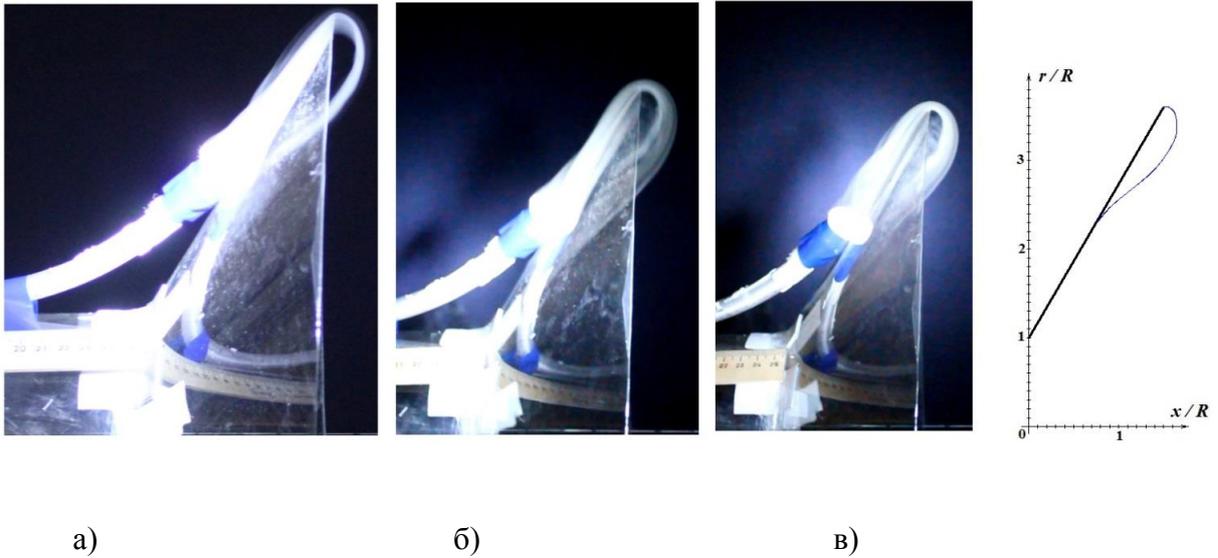


Рисунок 4.20 – Отрывная область на входе в раструб длиной в 3 калибра с углом наклона 60° :
 а) $b = 0.38$, $a_0 = 0.027$, $l = 0.38$, $a = 1.25$; $r_e = 2,66$; б) $b = 0.39$, $a_0 = 0.028$, $l = 0.38$, $a = 1.46$;
 $r_e = 2,68$; в) $b = 0.27$, $a_0 = 0.037$, $l = 0.35$, $a = 1.56$; $r_e = 2,81$; г) $b = 0.29$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.37$,
 $a = 1.52$, $r_e = 3.02$

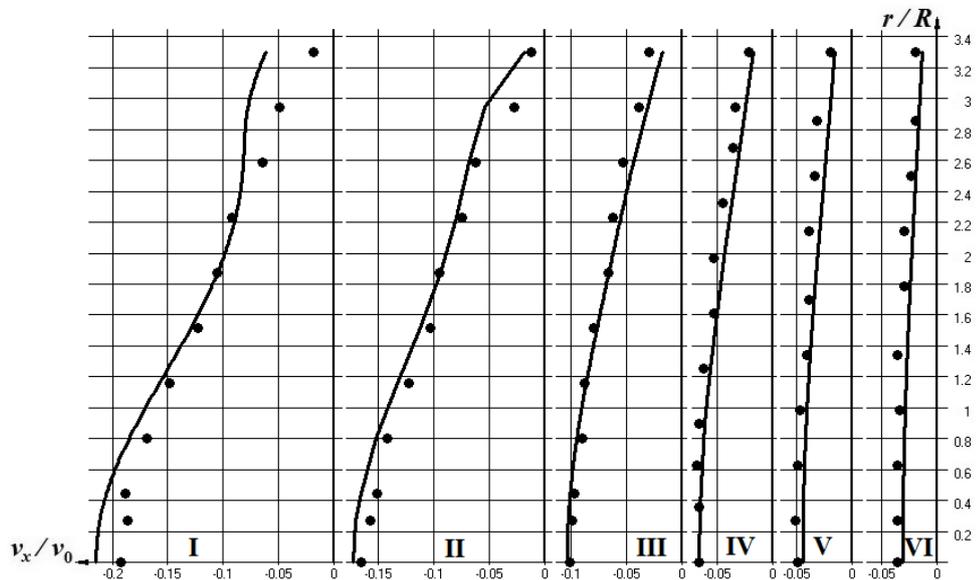


Рисунок 4.21 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной в 3 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,2678$;
 III - $x/R = 0,9821$; IV - $x/R = 1,6964$; V - $x/R = 2,4107$; VI - $x/R = 3,125$

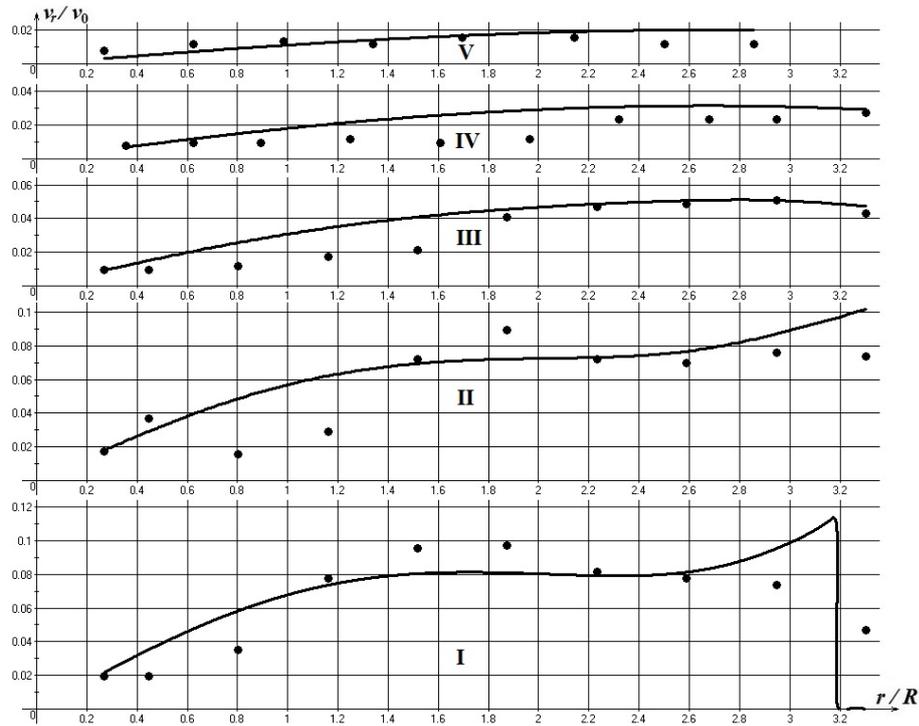


Рисунок 4.22 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной 3 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,2678$; III - $x/R = 0,9821$; IV - $x/R = 1,6964$; V - $x/R = 2,4107$; VI - $x/R = 3,125$

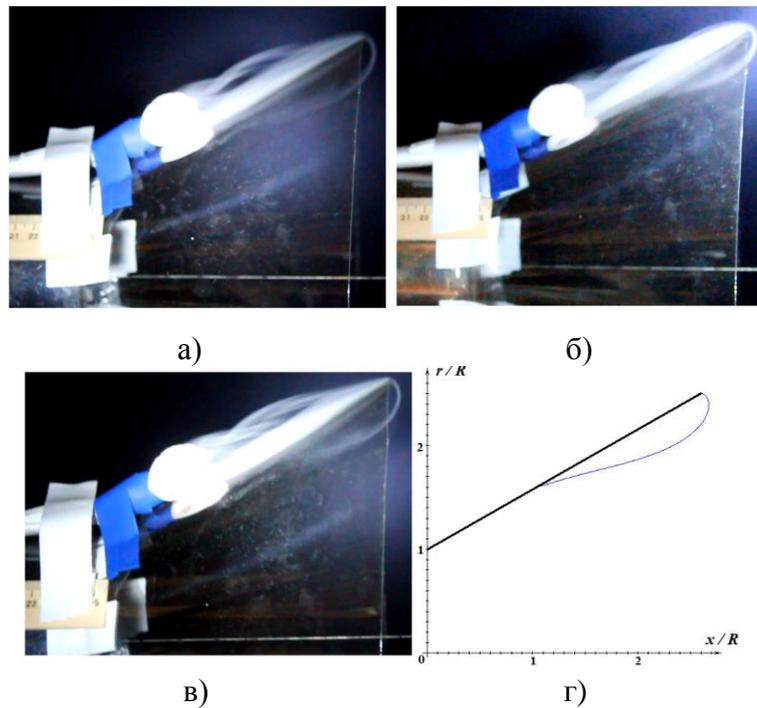


Рисунок 4.23 – Отрывная область на входе в раструб длиной 3 калибра с углом наклона 30° : а) $b = 0.44$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.48$, $a = 1.76$; $r_e = 1.90$; б) $b = 0.26$, $a_0 = 0.02$, $l = 0.48$, $a = 1.35$; $r_e = 2.1$; в) $b = 0.32$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.39$, $a = 1.22$; $r_e = 1.85$; г) $b = 0.30$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.42$, $a = 1.80$, $r_e = 2.2$

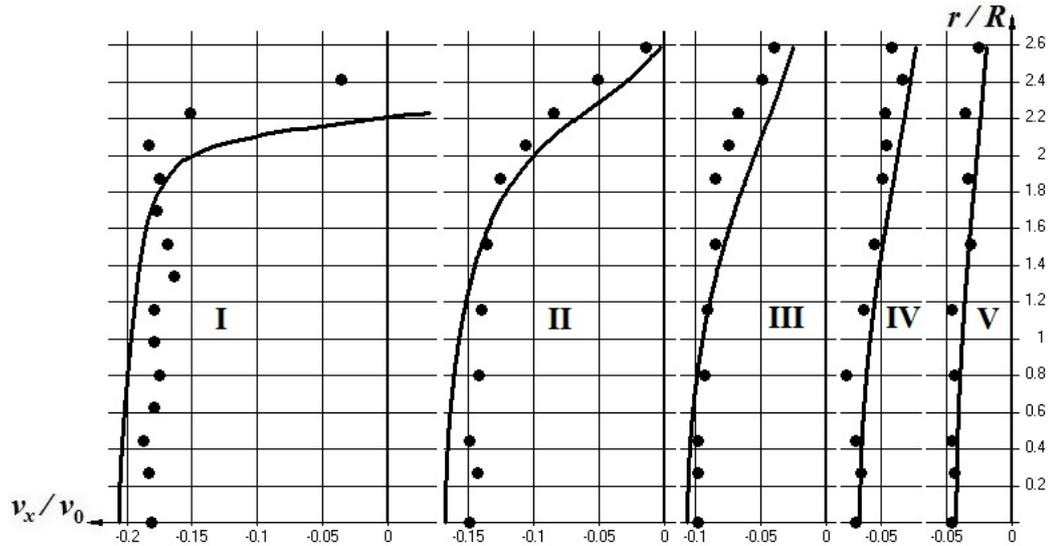


Рисунок 4.24 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной 3 калибра: I - $x/R = 0,0893$;
 II - $x/R = 0,4464$; III - $x/R = 1,1607$; IV - $x/R = 1,8750$; V - $x/R = 2,5893$

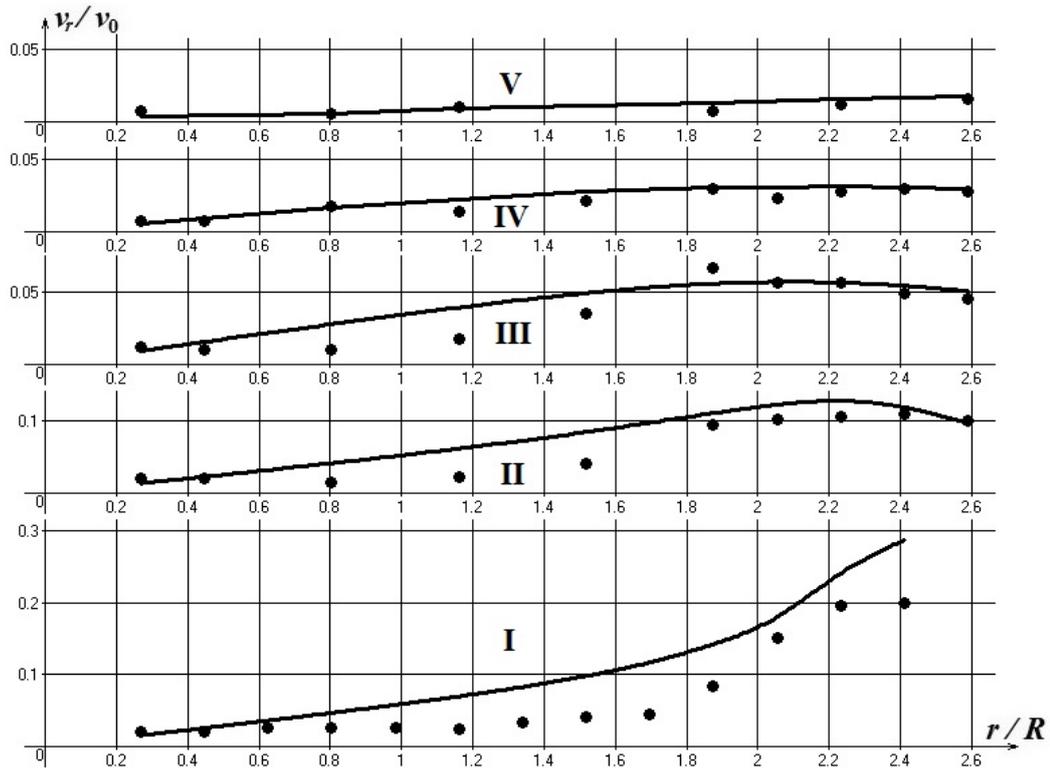


Рисунок 4.25 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной 3 калибра: I - $x/R = 0,0893$;
 II - $x/R = 0,4464$; III - $x/R = 1,1607$; IV - $x/R = 1,8750$; V - $x/R = 2,5893$

4.5. Отсос-раструб длиной в два калибра

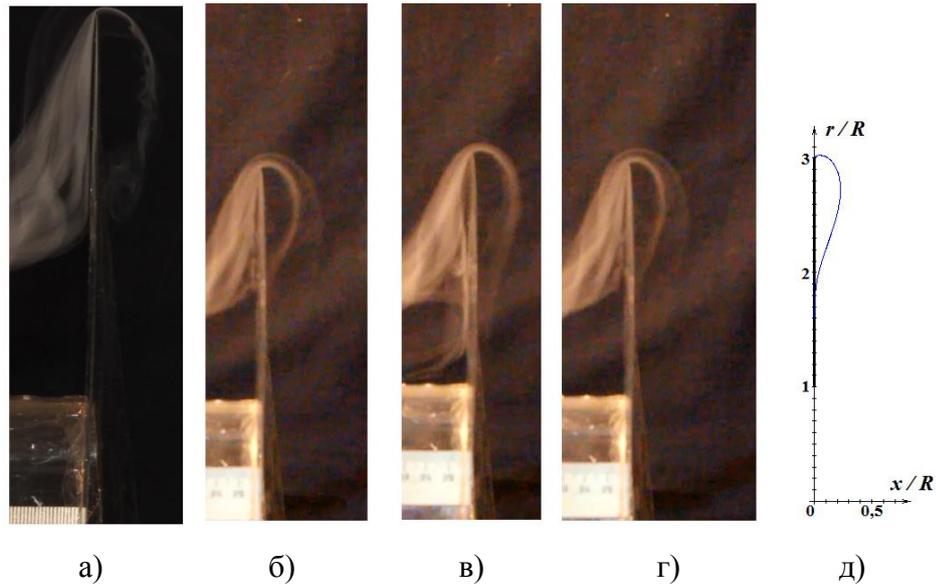


Рисунок 4.26 – Отрывная область на входе в раструб длиной 2 калибра с углом наклона 90° :

а) $b = 0.26$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.32$, $a = 1.00$; б) $b = 0.24$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.34$, $a = 0.94$;

в) $b = 0.30$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.35$, $a = 1.45$; г) $b = 0.25$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.35$, $a = 1.02$;

д) $b = 0.23$, $a_0 = 0.024$, $l = 0.27$, $a = 1.28$

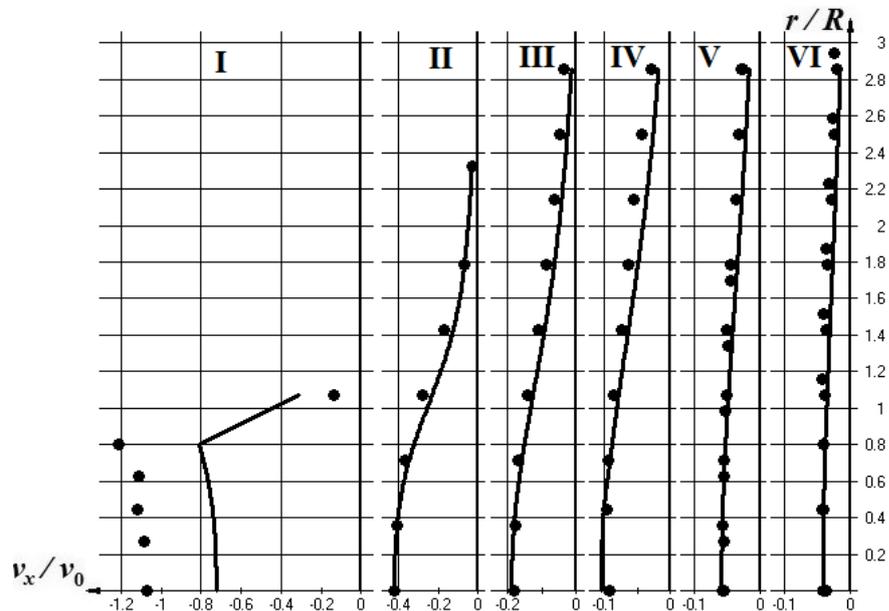


Рисунок 4.27 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей

скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$;

II - $x/R = 0,625$; III - $x/R = 1,339$; IV - $x/R = 1,964$; V - $x/R = 2,679$; VI - $x/R = 3,214$

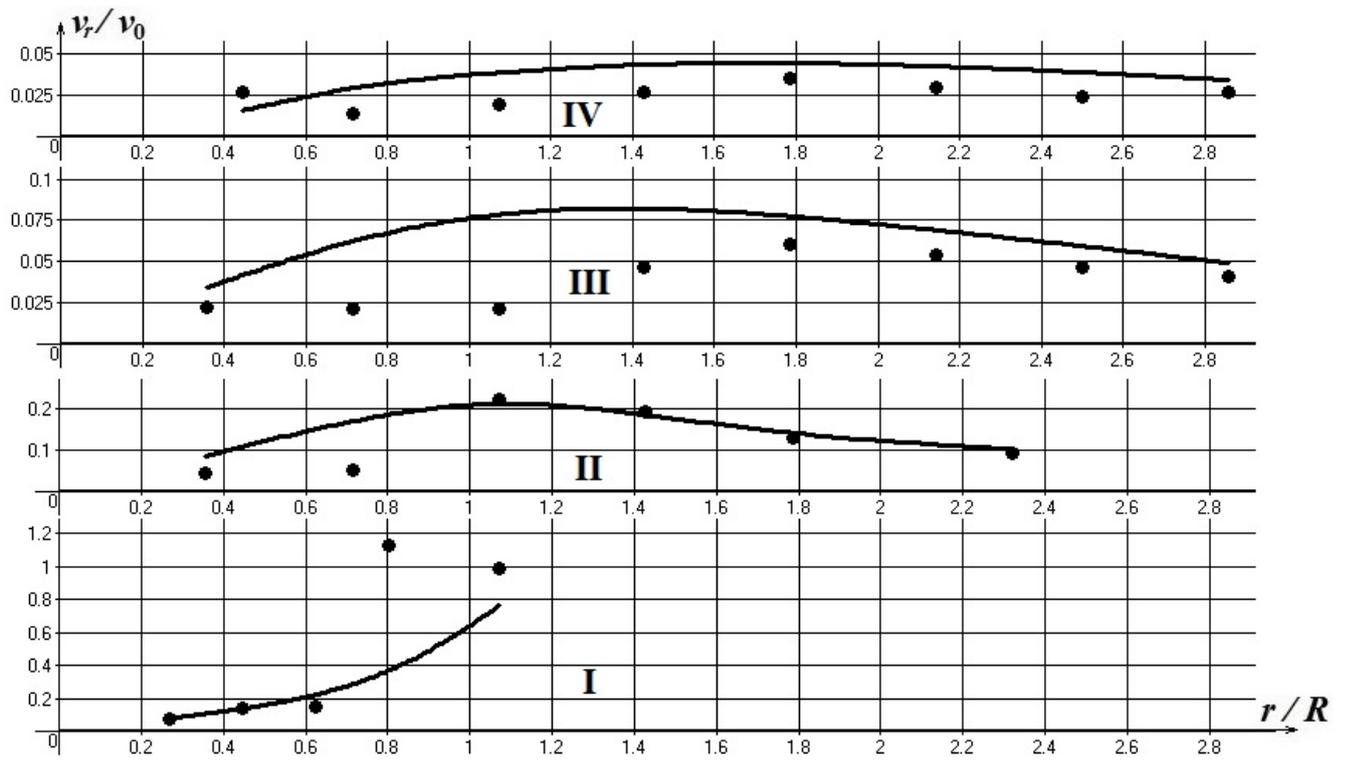


Рисунок 4.28 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,625$; III - $x/R = 1,339$; IV - $x/R = 1,964$

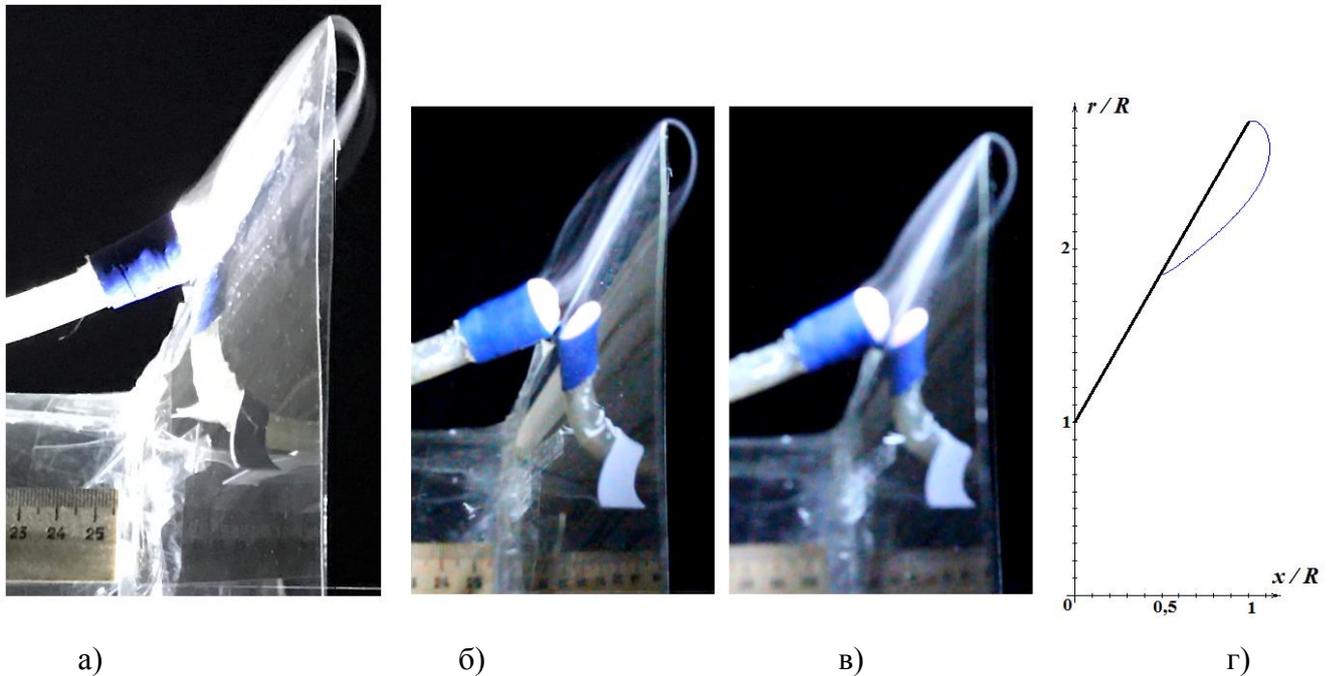


Рисунок 4.29 – Отрывная область на входе в раструб длиной 2 калибра с углом наклона 60° : а) $b = 0.18$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.30$, $a = 1.20$; $r_e = 1.68$; б) $b = 0.28$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.37$, $a = 1.62$; $r_e = 2.08$; в) $b = 0.25$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.21$, $a = 1.18$; $r_e = 2.06$; г) $b = 0.23$, $a_0 = 0.025$, $l = 0.28$, $a = 1.04$, $r_e = 2.28$

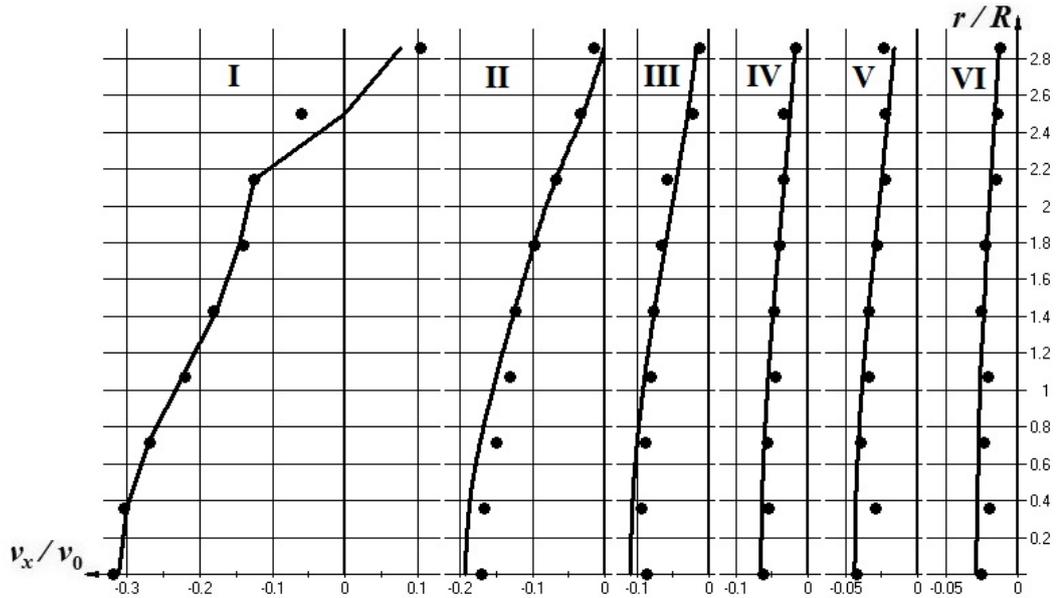


Рисунок 4.30 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,625$; III - $x/R = 1,339$; IV - $x/R = 2,054$; V - $x/R = 2,679$; VI - $x/R = 3,393$

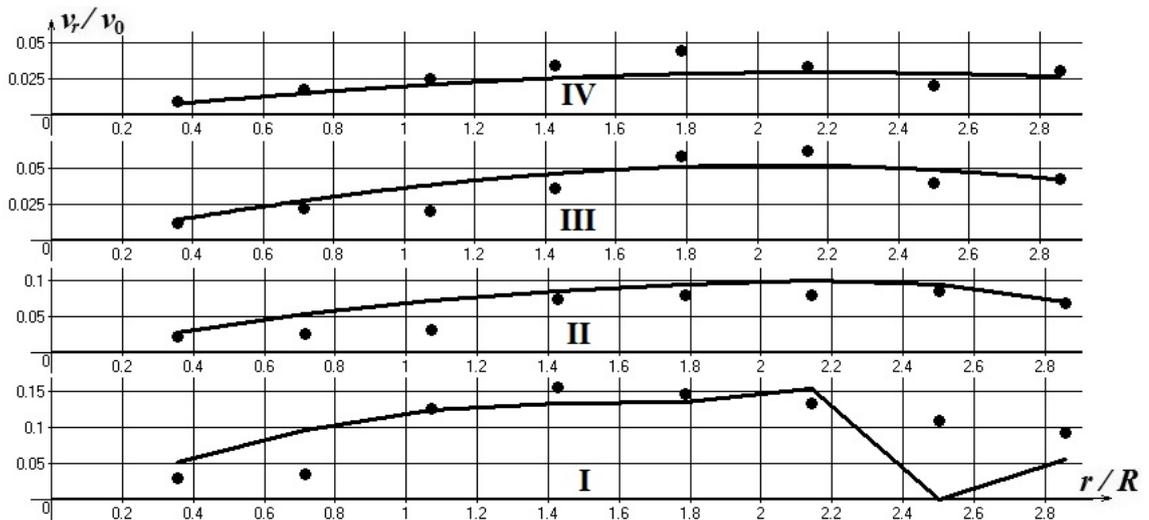


Рисунок 4.31 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,625$; III - $x/R = 1,339$; IV - $x/R = 2,054$; V - $x/R = 2,679$; VI - $x/R = 3,393$

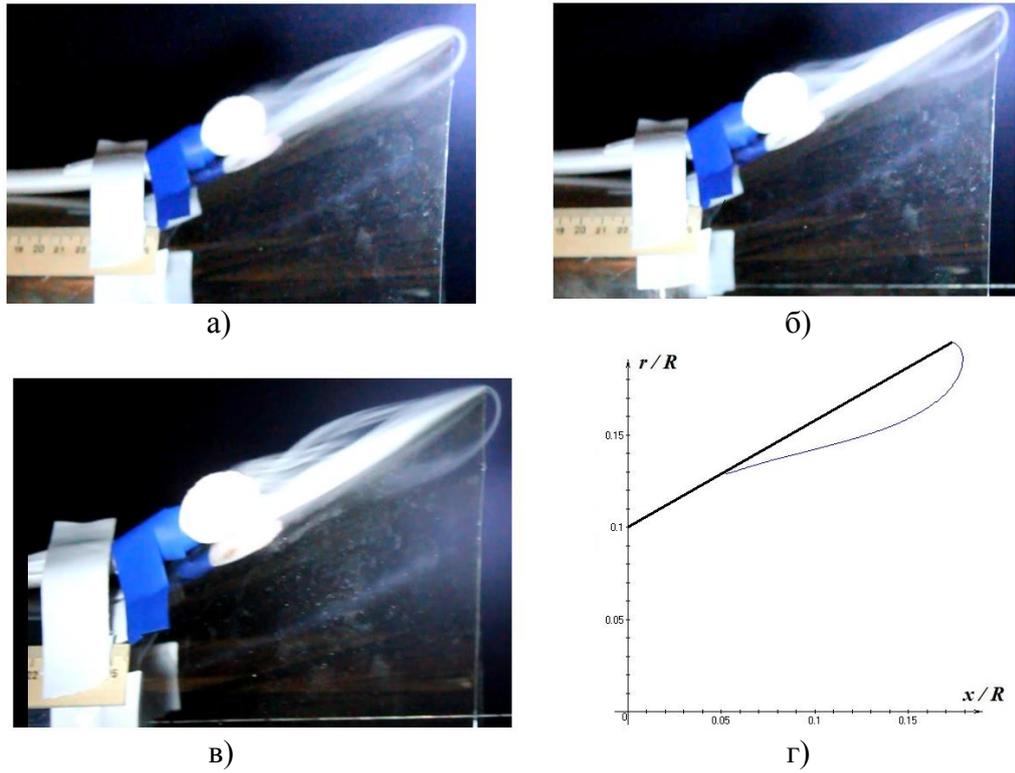


Рисунок 4.32 – Отрывная область на входе в раструб 2 калибра с углом наклона 30° :

а) $b = 0.24$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.37$, $a = 1.34$; $r_e = 2.12$; б) $b = 0.25$, $a_0 = 0.04$, $l = 0.45$, $a = 1.37$; $r_e = 2.11$; в) $b = 0.35$, $a_0 = 0.03$, $l = 0.38$, $a = 1.35$; $r_e = 2.12$; г) $b = 0.24$, $a_0 = 0.02$, $l = 0.34$, $a = 1.14$, $r_e = 1.76$

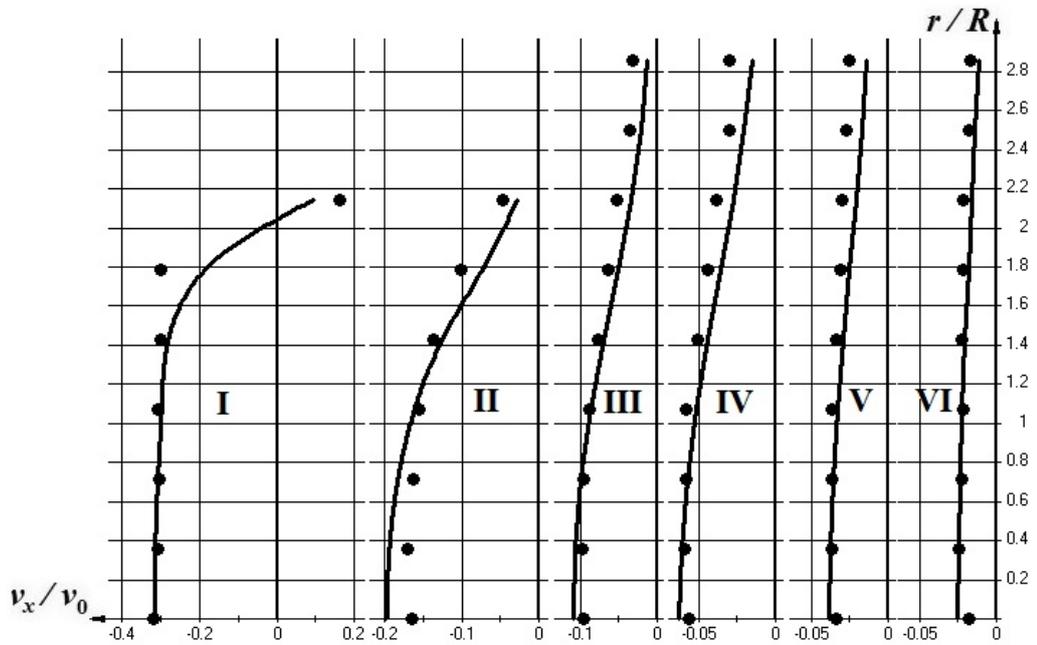


Рисунок 4.33 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,714$; III - $x/R = 1,429$; IV - $x/R = 2,143$; V - $x/R = 2,857$; VI - $x/R = 3,571$

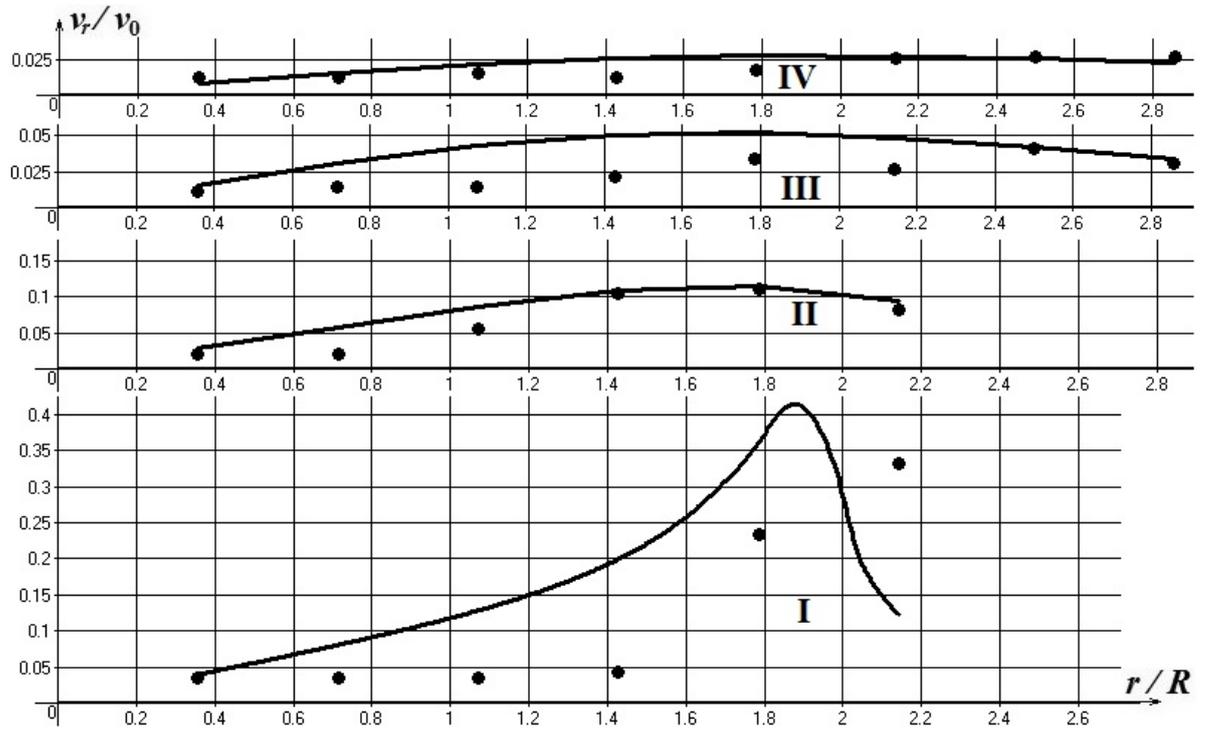


Рисунок 4.34 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной 2 калибра: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,714$; III - $x/R = 1,429$; IV - $x/R = 2,143$

4.6. Отсос-раструб длиной в один калибр

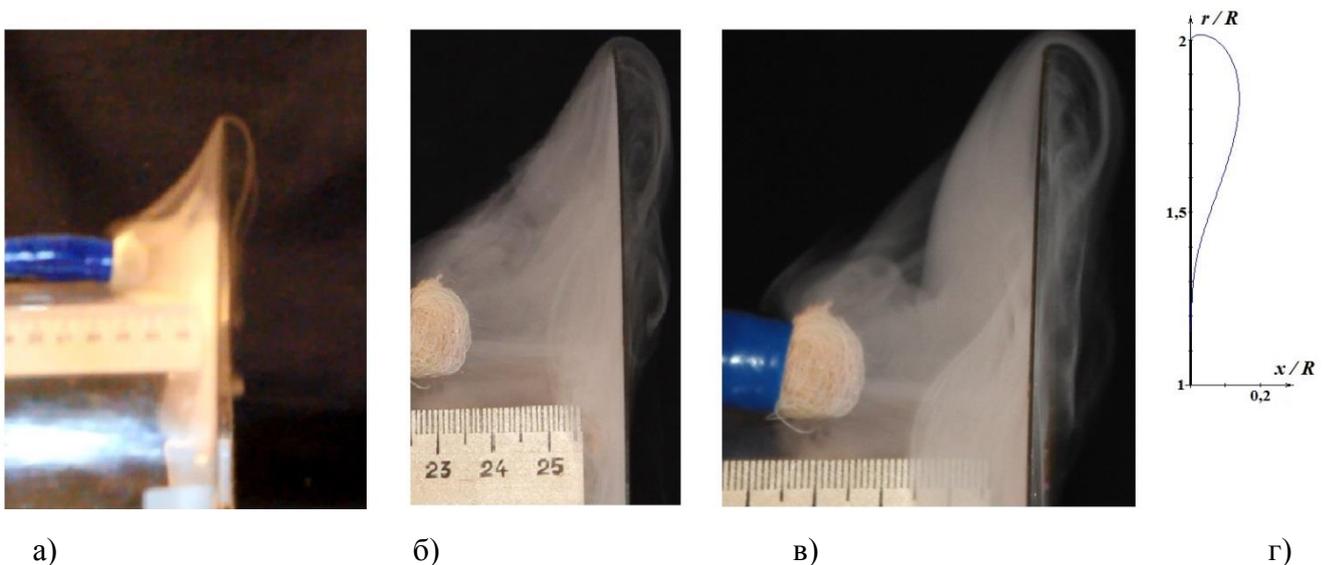


Рисунок 4.35 – Отрывная область на входе в раструб длиной в 1 калибр с углом наклона 90° : а) $b = 0.14$, $a_0 = 0.02$, $l = 0.21$, $a = 0.71$; б) $b = 0.14$, $a_0 = 0.02$, $l = 0.29$, $a = 0.57$; в) $b = 0.16$, $a_0 = 0.02$, $l = 0.24$, $a = 0.46$; г) $b = 0.14$, $a_0 = 0.014$, $l = 0.17$, $a = 0.73$

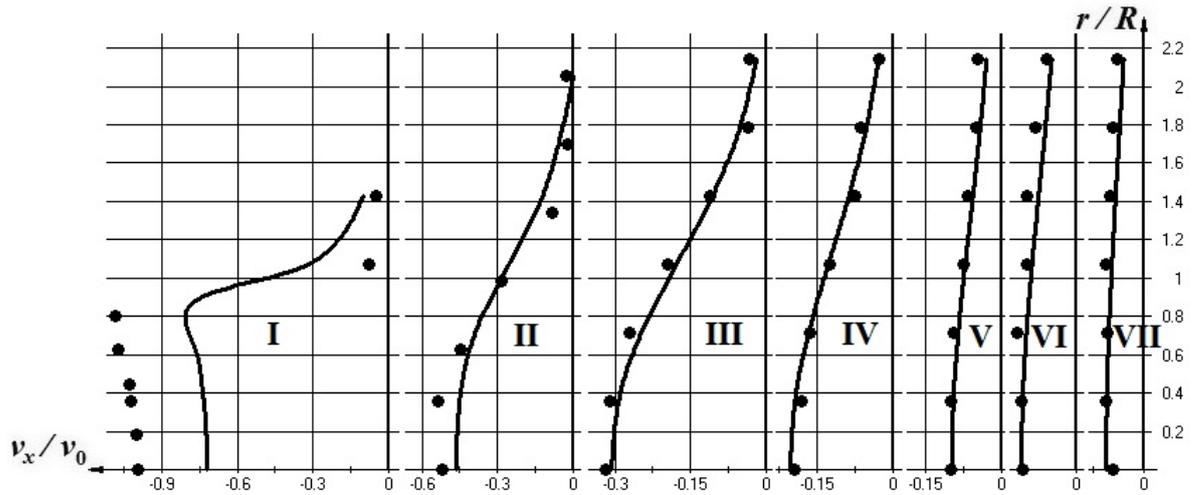


Рисунок 4.36 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,536$; III - $x/R = 0,893$; IV - $x/R = 1,25$; V - $x/R = 1,964$; VI - $x/R = 2,6791$; VII - $x/R = 3,214$

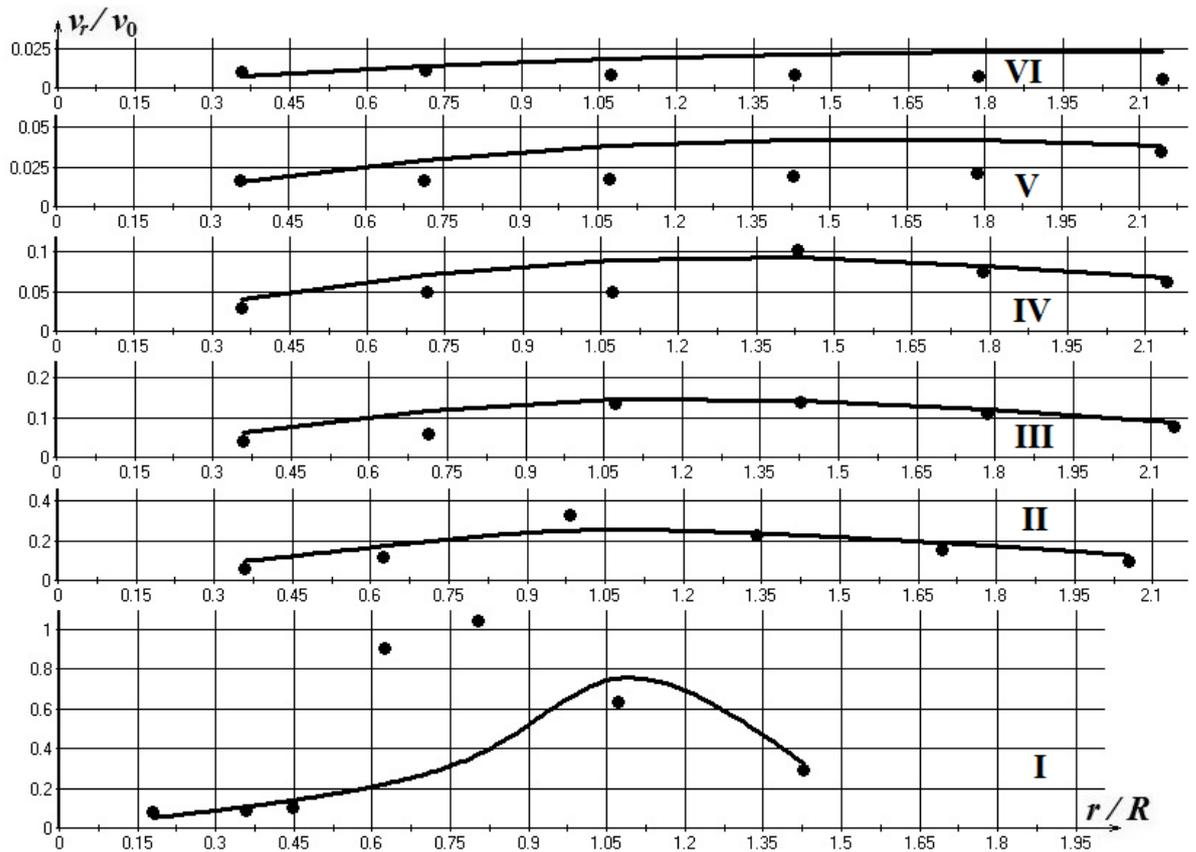


Рисунок 4.37 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 90° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$; II - $x/R = 0,536$; III - $x/R = 0,893$; IV - $x/R = 1,25$; V - $x/R = 1,964$; VI - $x/R = 2,6791$; VII - $x/R = 3,214$

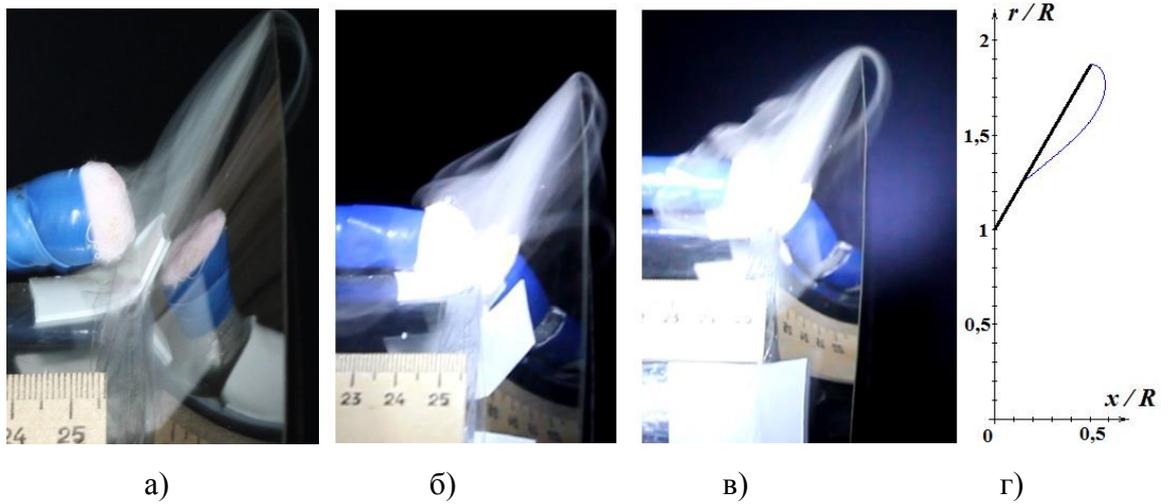


Рисунок 4.38 – Отрывная область на входе в раструб длиной в 1 калибр с углом наклона 60° :
 а) $b=0.18$, $a_0=0.017$, $l=0.2$, $a=0.76$; $r_e=1.55$; б) $b=0.14$, $a_0=0.02$, $l=0.16$, $a=0.8$;
 $r_e=1.61$; в) $b=0.14$, $a_0=0$, $l=0.24$, $a=0.6$; $r_e=1.54$; г) $b=0.15$, $a_0=0.016$, $l=0.19$,
 $a=0.71$, $r_e=1.57$

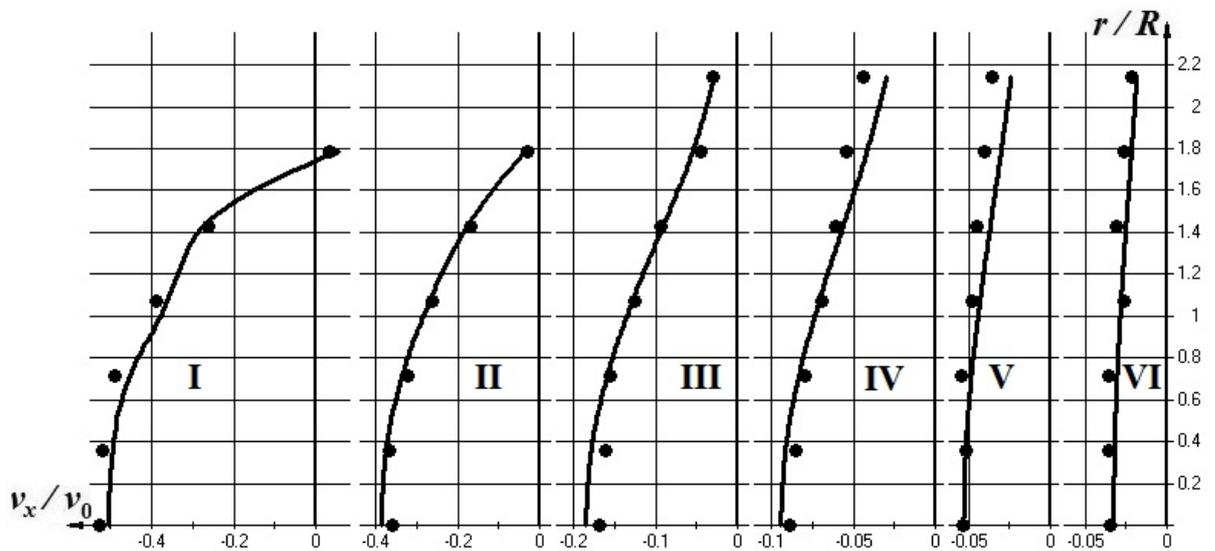


Рисунок 4.39 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$;
 II - $x/R = 0,357$; III - $x/R = 1,071$; IV - $x/R = 1,786$; V - $x/R = 2,5$; VI - $x/R = 3,214$

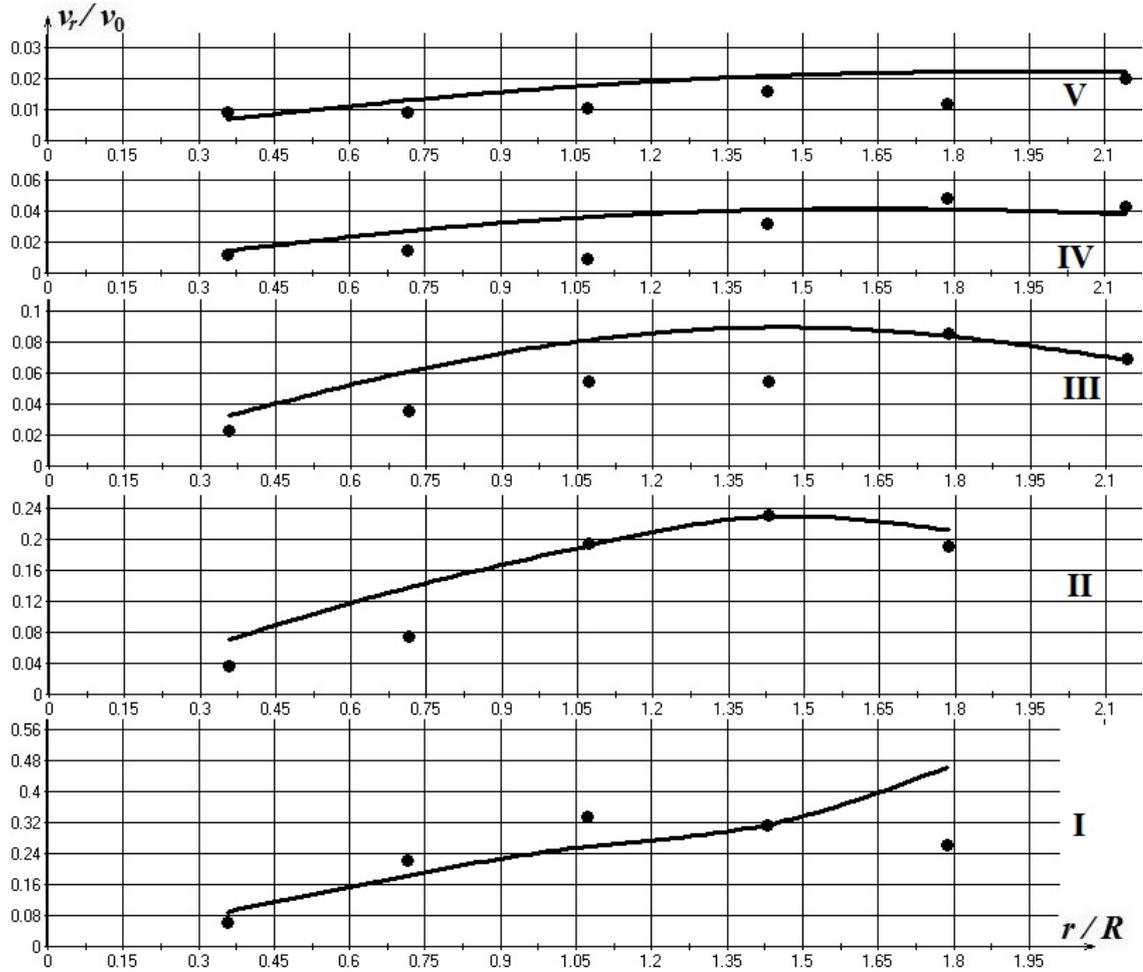


Рисунок 4.40 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 60° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$;

II - $x/R = 0,357$; III - $x/R = 1,071$; IV - $x/R = 1,786$; V - $x/R = 2,5$

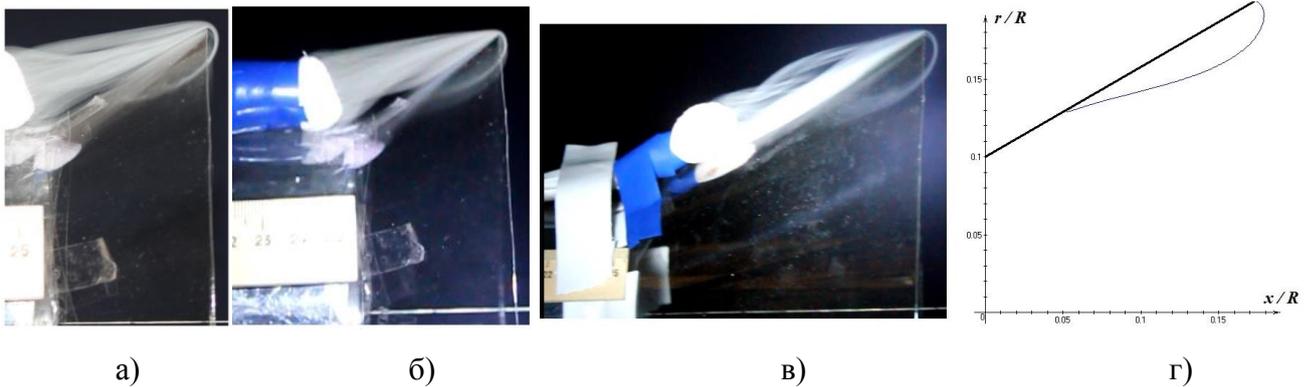


Рисунок 4.41 – Отрывная область на входе в раструб длиной в 1 калибр с углом наклона 30° : а) $b = 0.16, a_0 = 0.016, l = 0.2, a = 0.66; r_e = 1.2$; б) $b = 0.13, a_0 = 0.016, l = 0.22, a = 0.54; r_e = 1.26$; в) $b = 0.15, a_0 = 0.018, l = 0.23, a = 0.80; r_e = 1.25$; г) $b = 0.177, a_0 = 0.017, l = 0.24, a = 0.92, r_e = 1.32$

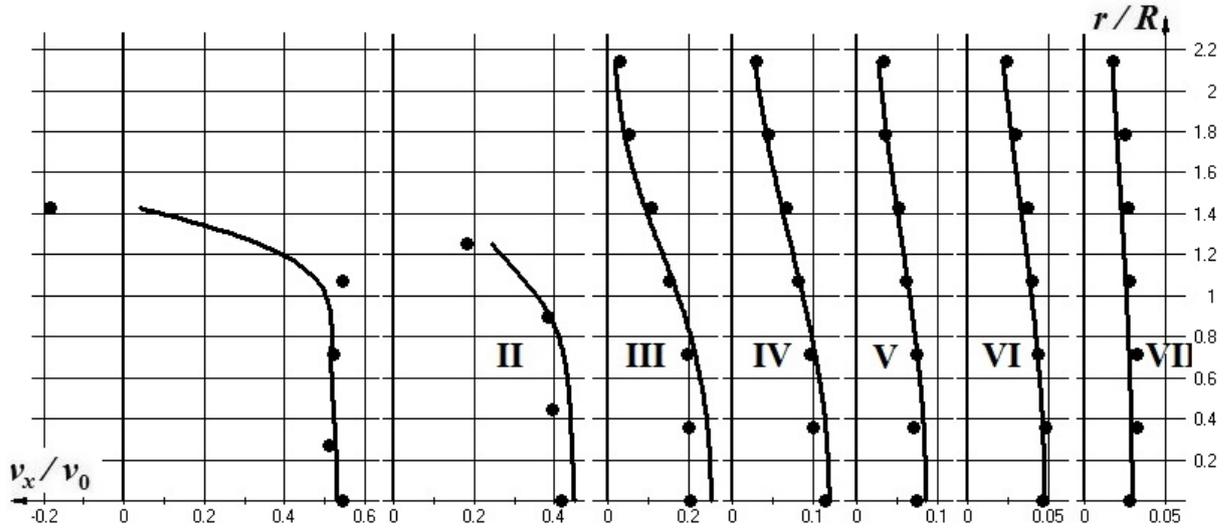


Рисунок 4.42 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили осевой составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$;
 II - $x/R = 0,268$; III - $x/R = 1,071$; IV - $x/R = 0,804$; V - $x/R = 1,518$; VI - $x/R = 1,875$; VII - $x/R = 2,589$;
 VIII - $x/R = 3,304$

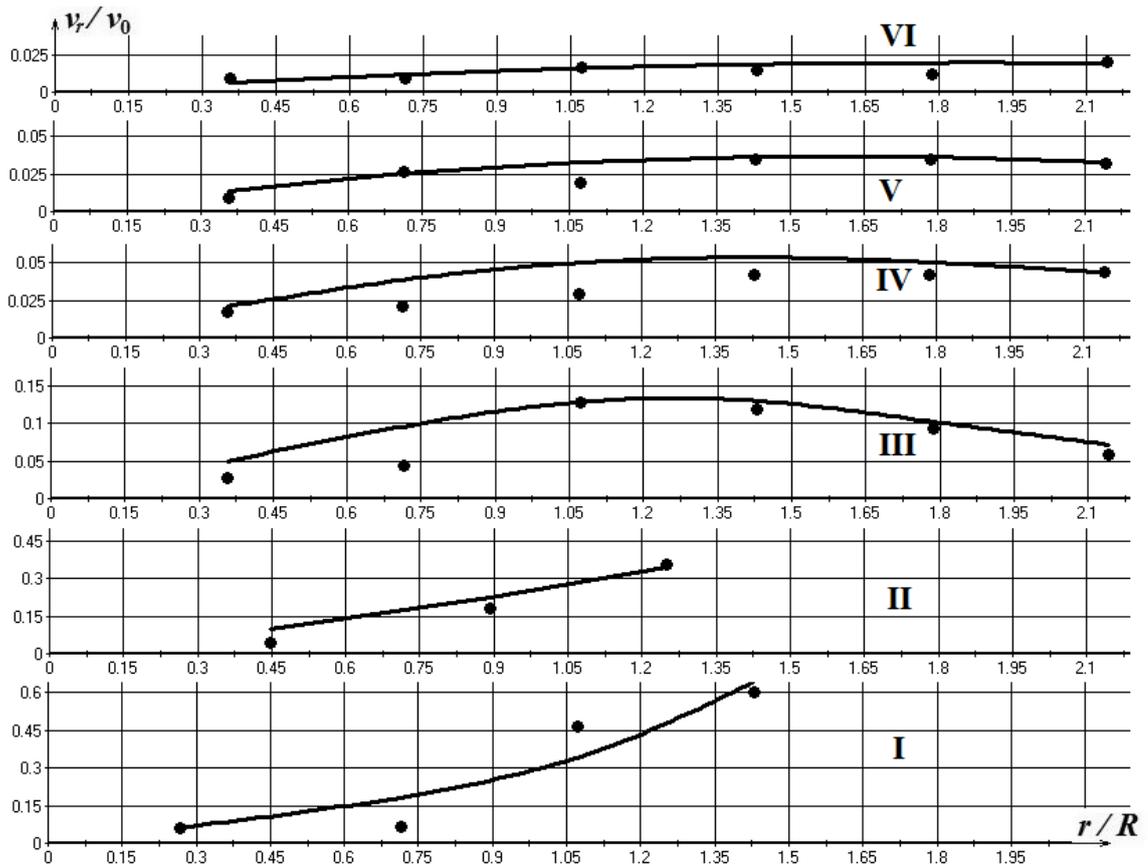


Рисунок 4.43 – Безразмерные экспериментальные и расчётные профили радиальной составляющей скорости вблизи раструба под углом 30° и длиной в 1 калибр: I - $x/R = 0,0893$;
 II - $x/R = 0,268$; III - $x/R = 1,071$; IV - $x/R = 0,804$; V - $x/R = 1,518$; VI - $x/R = 1,875$

4.7. Обсуждение полученных результатов

Сравнение экспериментальных и расчётных профилей составляющих скорости $\mathbf{v} = \{v_x, v_r\}$ при разных углах наклона β и длинах d раструба, представленных на вышеприведённых рисунках, производилось не только визуально, но и при помощи различных критериев (таблица В.15 приложения В) [120-122].

Определялись коэффициенты линейной корреляции Пирсона $r \pm dr$, критерий достоверности Стьюдента t и критерий адекватности Фишера F в n точках сравнения. При оценке силы связи коэффициентов корреляции использовалась шкала Чеддока. Очень высокая сила связи ($0.9 < r \leq 1$) между экспериментальными и расчётными величинами скорости оказалась в 64% случаях (18 из 28), высокая ($0.7 < r \leq 0.9$) в 29 % случаях (8 из 28) и средняя ($0.5 < r \leq 0.7$) в 7% случаях (2 из 28). В 93% случаях (26 из 28) средние значения для расчета и эксперимента равны по критерию достоверности Стьюдента с вероятностью 0,95. В 71% случаев разброс относительно среднего для эксперимента и расчета с вероятностью 0,95 равны по критерию адекватности Фишера, с вероятностью 0,99 таких случаев 82%.

При сравнении средних значений параметров отрывной области с расчётами методом МДВ (таблица В.16) коэффициент линейной корреляции Пирсона показывает высокую тесноту связи между расчётом и экспериментом для параметров b и l , для остальных размеров – очень высокую. Критерий достоверности Стьюдента меньше табличных значений $t(\alpha, 2n - 2)$ для любых уровней значимости при приведённых значениях n , критерий адекватности Фишера меньше табличных значений $F(\alpha, n - 1)$ указанных n .

На приведенных выше рисунках 4.7, 4.8, 4.11, 4.14, 4.17, 4.20, 4.23, 4.26, 4.29, 4.32, 4.35, 4.38, 4.41 представлены фотографии границы отрывной области и расчетная линия отрыва. Визуально наблюдается удовлетворительное совпадение расчетной и экспериментальной формы этих границ. Фотографий приведено

несколько на каждом рисунке, так как наблюдалось пульсирование границы отрыва. Эти фотографии обрабатывались, определялись радиус и характерные размеры отрывной области в пикселях. Затем были найдены безразмерные их величины, которые изображены чёрными кружочками на рисунке 4.44. Холодный пар, визуализирующий линию отрыва потока даёт более чёткую картину течения в непосредственной близости от острой кромки раструба. Затем картина размывается, при значительном увеличении наблюдается цепочка Кармана – вихревая дорожка, уходящая внутрь раструба. Замечена небольшая закрутка потока внутри отрывной области.

Графическое изображение сравнения экспериментальных и расчётных размеров отрывной области течения на входе в отсос-раструб представлено на рисунке 4.44.

Ряд экспериментов были проведены дважды (таблица В.1 – таблица В.2, таблица В.6, таблица В.9 приложения В) для проверки их воспроизводимости при помощи критерия Кохрена. Расчётное значение критерия Кохрена $G_p = 0,29$ для таблицы В.9 при $x = 18$ см и $n = 9$, числом степеней свободы $f = 1$, уровне значимости $\alpha = 0.05$ меньше критического значения критерия Кохрена $G = 0.639$; $G_p = 0.31$ для таблицы В.9 при $x = 15$ см и $n = 9$, $f = 1$, $\alpha = 0.05$ меньше $G = 0.639$. Для таблицы В.6 при $x = 2$ см для обеих составляющих скорости в одинаковых точках в количестве $n = 11$, числом степеней свободы $f = 1$, уровне значимости $\alpha = 0.05$ $G_p = 0.40 < G = 0.541$. Для течения воздуха вблизи круглой трубы без раструба, поле скоростей замерялось дважды (таблица В.1 – таблица В.2): при работе одного и двух вентиляторов. Сравнивались безразмерные значения поля скоростей (отнесённые к средней скорости в трубе v_0) в $n = 34$ наиболее близких точках. Числом степеней свободы было $f = 1$. В этом случае $G_p = 0.22$, что при уровне значимости $\alpha = 0.05$ меньше критерия Кохрена $G = 0.237$. Следовательно, произведённые эксперименты воспроизводимы, оценки дисперсий однородны.

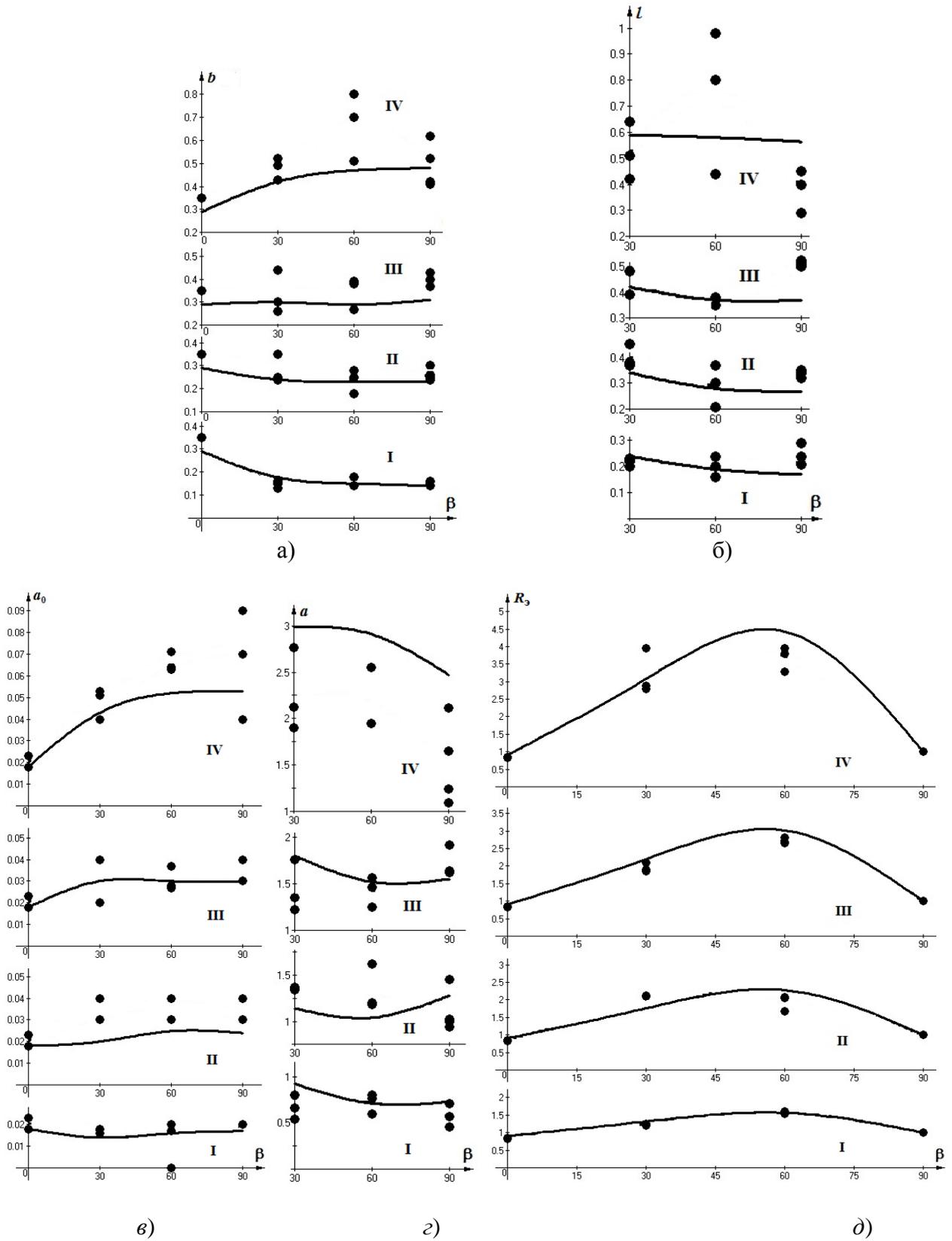


Рисунок 4.44 – Зависимость размеров отрывной области от угла наклона раструба β :

а) параметр b ; б) параметр l ; в) параметр a_0 ; г) параметр a ; д) параметр R_e

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана экспериментальная установка для определения поля скоростей и размеров отрывной области на входе в отсосы – раструбы. Определены поля скоростей воздушного течения во всасывающем факеле отсоса-раструба и размеры отрывной области при входе в отсос для разных углов наклона и длины раструба. Произведённые эксперименты воспроизводимы, оценки дисперсий однородны.

2. Произведено сравнение между экспериментально измеренными величинами скорости и размерами отрывной области с расчётными по разработанному вычислительному алгоритму и компьютерной программе.

Полученные расчётные значения скорости:

- тесно связаны с экспериментальными величинами: более чем в 93% случаев имеют высокую или очень высокую корреляцию и лишь в оставшихся 7% случаев – среднюю;

- достоверны относительно экспериментальных в подавляющем количестве случаев: более чем в 93% случаев средние значения по критерию Стьюдента равны;

- дают удовлетворительную адекватность, относительно экспериментальных: в более чем 80% случаев разброс данных относительно средних по критерию Фишера равны.

При сравнении средних значений параметров отрывной области с расчётами коэффициент линейной корреляции Пирсона показывает высокую или очень высокую тесноту связи между расчётом и экспериментом для всех определяемых параметров, критерий достоверности Стьюдента доказывает достоверность, а критерий Фишера адекватность результатов.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНО-СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА

5.1. Моделирование воздушно-струйного экранирования отсоса кольцевой приточной струёй методом многоугольных вихревых рамок

Целью параграфа является совершенствование метода расчёта воздушного течения вблизи круглого местного отсоса, экранированного приточной кольцевой струёй и определение возможности повышения зоны его.

5.1.1. Постановка задачи и описание алгоритма расчёта

Круглый патрубок имеет всасывающее круглое отверстие радиуса r и приточное кольцо с радиусами $r_1 < r_2$, $r_2 - r_1 = d$ (рисунок 5.1). Точка M расположена на оси отсоса на расстоянии l от начала координат. Скорость во всасывающем отверстии обозначена v_0 ; а в кольцевом отверстии - v_p .

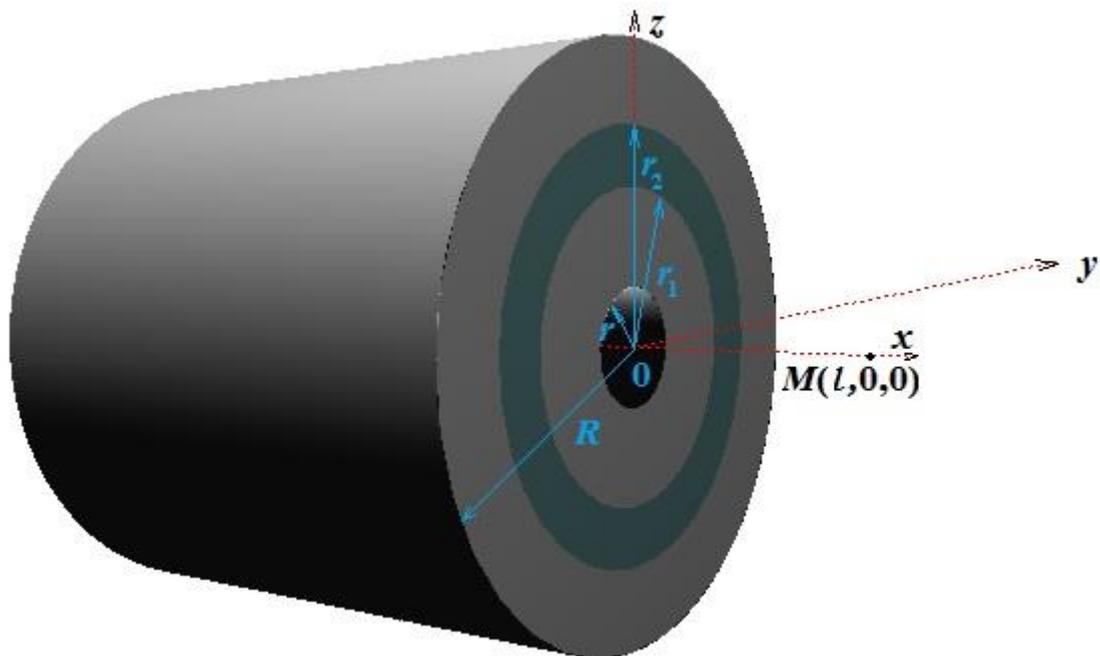


Рис.5.1. Приточно-вытяжное устройство

Для решения задачи использованы дискретные вихревые рамки (многоугольники) [71,117].

Интегральное уравнение, соответствующее уравнению Лапласа здесь имеет следующий вид:

$$\iint_S G(x, \xi) \omega(\xi) ds(\xi) = v_n(x) - \iint_\sigma \mu(\xi) G(x, \xi) d\sigma(\xi),$$

где S – это граничная поверхность, σ – свободная вихревая поверхность, а остальные обозначения такие же, как и в п.1.2.

Функция влияния здесь приобретает следующий вид:

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

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 рамки под номером k .

Вектор скорости \mathbf{v} во внутренней точке x вдоль единичного направления \mathbf{n} определяется при помощи формулы:

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

где $\Gamma(k)$ – интенсивность вихревой рамки. Для краткости далее введено обозначение $G^{pk} = (\mathbf{G}(x^p, k) \cdot \mathbf{n})$, x^p – p -я расчётная (контрольная) точка. Эти точки располагались посредине между рамками по границе трубы и в центре данных рамок во всасывающем или приточном сечениях (рисунок 5.2).

В произвольный момент времени $t = m \cdot \Delta t$ для определения интенсивностей граничных вихревых рамок использовалась система уравнений:

$$\sum_{k=1}^N G^{pk} \Gamma^k + \sum_{l=1}^3 \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau l} \gamma^{\tau l} = v^p,$$

а скорость в этот момент времени в точке x вычислялась по следующей формуле:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G^k \Gamma^k + \sum_{l=1}^3 \sum_{\tau=1}^m G^{\tau l} \gamma^{\tau l},$$

где G^k – функция влияния k -й рамки с интенсивностью Γ^k , $G^{p\tau l}$ – функция влияния вихревой рамки интенсивностью $\gamma^{\tau l}$, образующейся на l -й кромке в

данный момент времени τ на p -ю расчётную точку; G^{tl} функция влияния той же рамки на точку x .

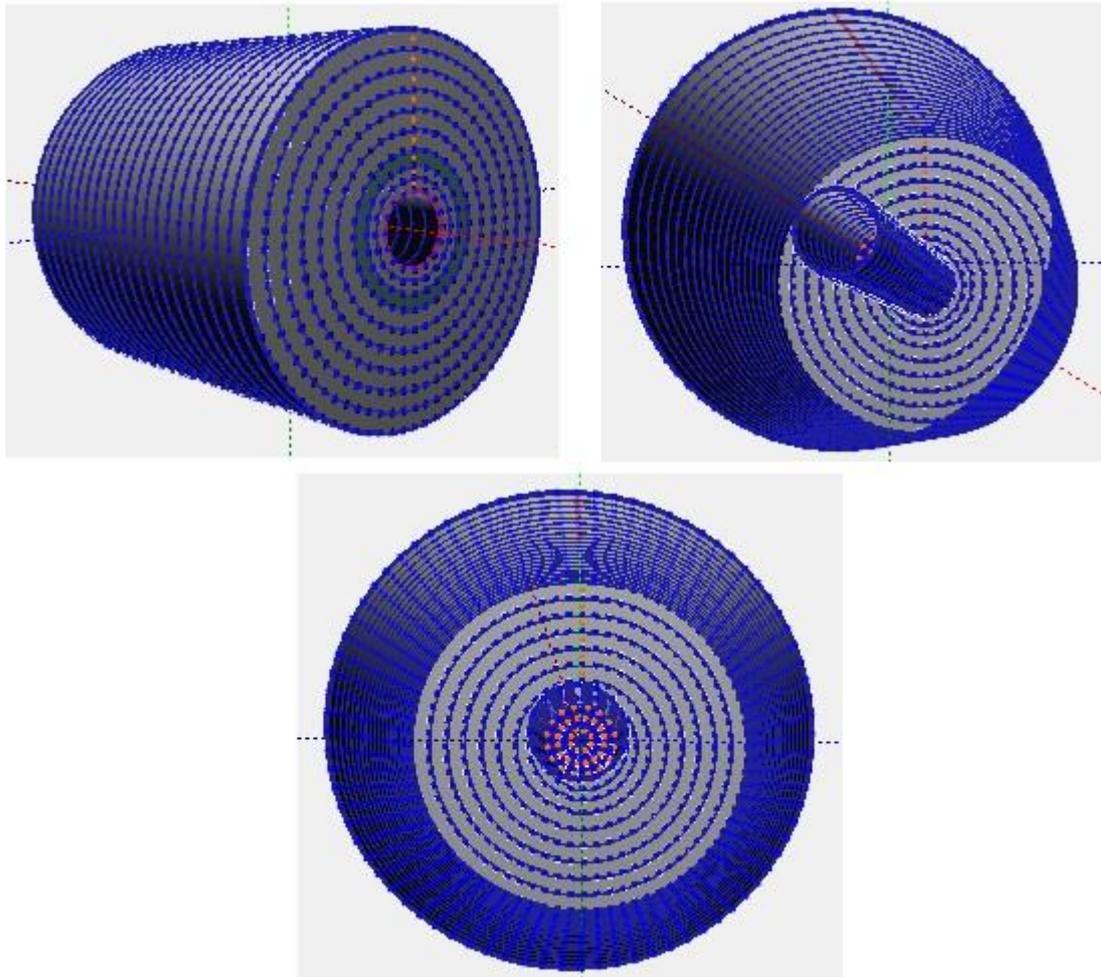


Рисунок 5.2. Дискретизация границы области

Вычислительный алгоритм аналогичен ранее описанному для кольцевых вихрей.

В каждый модельный момент времени в воздушный поток сходили три рамки с интенсивностью рамок приточного и кольцевого сечений. Циркуляции этих вихревых рамок во времени не изменяются.

5.1.2. Обсуждение результатов вычислительного эксперимента

Все размеры измерялись в калибрах, т.е. отнесены к радиусу отсоса: $\bar{r}_1 = r_1 / r$; $\bar{r}_2 = r_2 / r$; $\bar{x} = x / r$; $\bar{l} = l / r$. Величины скорости отнесены к скорости во всасывающем канале: $\bar{v} = v / v_0$, $\bar{v}_p = v_p / v_0$ и т.д.

Расчёт производился при длине трубы 2 м; $r = 0,1$ м; внешнем радиусе трубы $R = 0,5$ м; $v_0 = 1$ м/с; количестве присоединенных 16-угольных рамок равным 100; шаге дискретности 0,02 м; $v_p = 5$ м/с; шаге времени 0,004 с.

Вначале определялся наиболее эффективный радиус r_1 . Скорость v_p не изменялась при увеличении r_1 , при этом расход воздуха сохранялся, а это неизбежно вело к изменению ширины кольца $r_2 - r_1$. Ширина уменьшалась при возрастании r_1 .

Величина осевой составляющей скорости, направленной к отсосу, принималась положительной (рисунок 5.1).

Из рисунка 5.3 следует, что при $\bar{r}_1 = 1,2$; $\bar{r}_2 = 2,2$ (кривая 1) кольцевое экранирование отсоса не способствует повышению скорости на его оси при удалении на расстояние более 3-х калибров от начала координат, струя смыкается и наблюдается воздушное течение в обратном направлении. Без притока (кривая 7) и отсосе со скоростью 17 м/с, которая обеспечивает равенство расхода вытяжного воздуха расходу суммарного вытяжного и приточного воздуха, скорость воздуха на оси выше, чем при экранировании приточной струей в диапазоне до 3,5 калибров. При иных расположениях приточного кольца (кривые 2, 6-8) на расстоянии до 12 калибров, экранирование имеет смысл. Например, при удалении на 9 калибров, скорость воздуха при действии экранирования будет выше более чем в десять раз. Наибольший эффект от экранирования наблюдается при $\bar{r}_1 = 1,6$; $\bar{r}_2 = 2,44$ (кривая 8). При росте радиуса кольца графики изменения скорости воздуха на оси близки (кривые 3-6). Линии 2-6, 8 имеет подобную

функциональную зависимость. Вначале они убывают, имеют минимум при $l/r \approx 2$, возрастают достигая максимума в диапазоне $\bar{l} = 8 \div 10$.

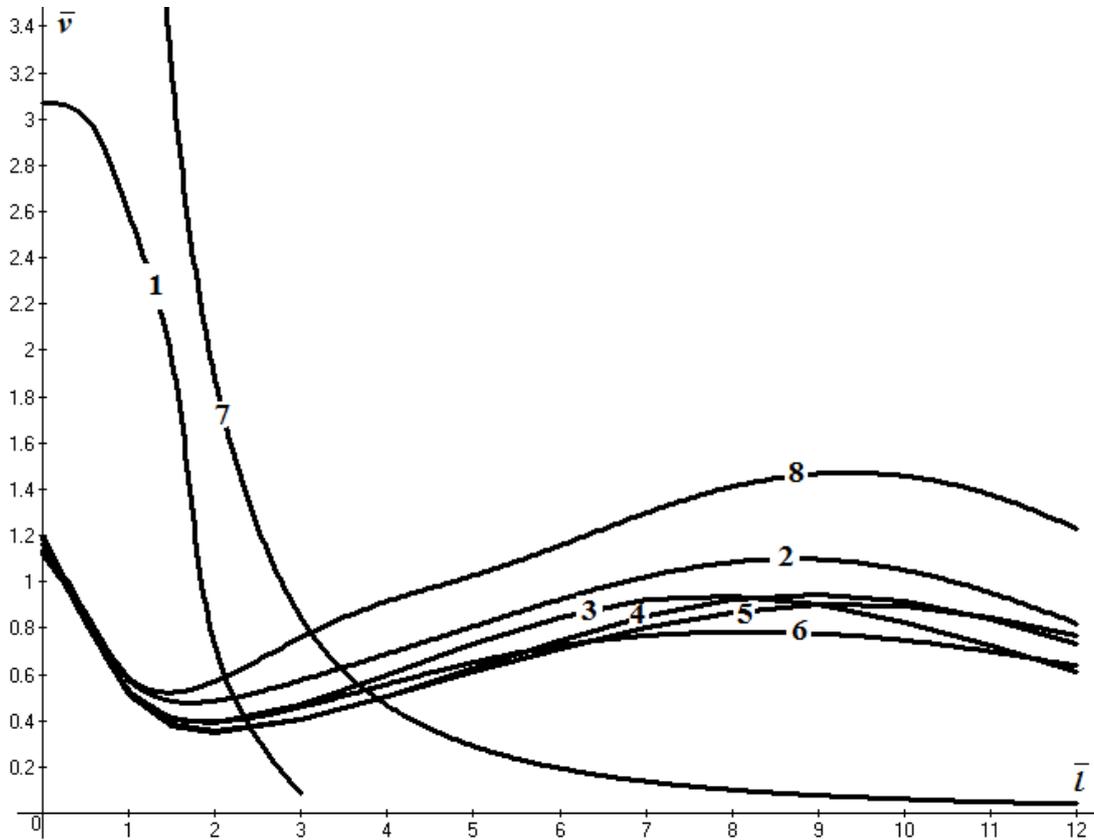


Рисунок 5.3. Зависимость скорости воздуха на оси отсоса при удалении от него:

1 - $\bar{r}_1 = 1,2; \bar{r}_2 = 2,2$; 2 - $\bar{r}_1 = 2,2; \bar{r}_2 = 2,87$; 3 - $\bar{r}_1 = 4,3; \bar{r}_2 = 4,68$; 4 - ($\bar{r}_1 = 3,88; \bar{r}_2 = 4,3$; 5 - $\bar{r}_1 = 3,41; \bar{r}_2 = 3,88$; 6 - $\bar{r}_1 = 2,87; \bar{r}_2 = 3,41$; 7 - без приточного кольца; 8 - $\bar{r}_1 = 1,6; \bar{r}_2 = 2,44$

Наибольшая осевая скорость воздуха наблюдается при минимальной ширине кольца (рисунок 5.4, кривая 1). Наименьший перепад осевой скорости наблюдается при ширине кольца равной 0,4 калибра (кривая 2), но величина скорости примерно в два раза меньше, чем в предыдущем случае. При увеличении ширины кольца до 0,8 калибра, скорость снижается не столь заметно (кривая 3). Для кривых 1-4 имеется максимум скорости подтекающего воздуха, что связано с наличием рециркуляционной зоны и близости к этой точке центра вихревого ядра, образующихся в результате истечения кольцевой струи. При ширине кольца

равной 1,4 калибра, длина рециркуляционной области резко уменьшается до величины 4 калибров (кривая 4). Во всех случаях расход воздуха перетекающего через кольцевое отверстие одинаков. Шаг по времени схода вихрей определялся отношением шага дискретности к начальной скорости истечения струи v_p .

Величины осевой скорости, отнесённые к скорости всасывания, становятся выше при увеличении скорости приточной струи (рисунок 5.5). Рассматривались четыре величины скорости истечения струи: в 20 раз большей, чем скорость всасывания (кривая 1), в 15 раз (кривая 2), в 10 раз (кривая 3), в пять раз (кривая 4). Здесь также заметен максимум при всех вычислительных экспериментах, объясняющийся теми же причинами. Во всех случаях ширина кольца была равна 0,4 калибра.

Как показали вычислительные эксперименты, при длительном расчёте до 1000-1500 шагов по времени, скорости вблизи всасывающего канала существенно увеличиваются.

Для проверки достоверности расчетов произведены вычисления скорости на оси OX (рисунок 5.6), без действия кольцевой струи.

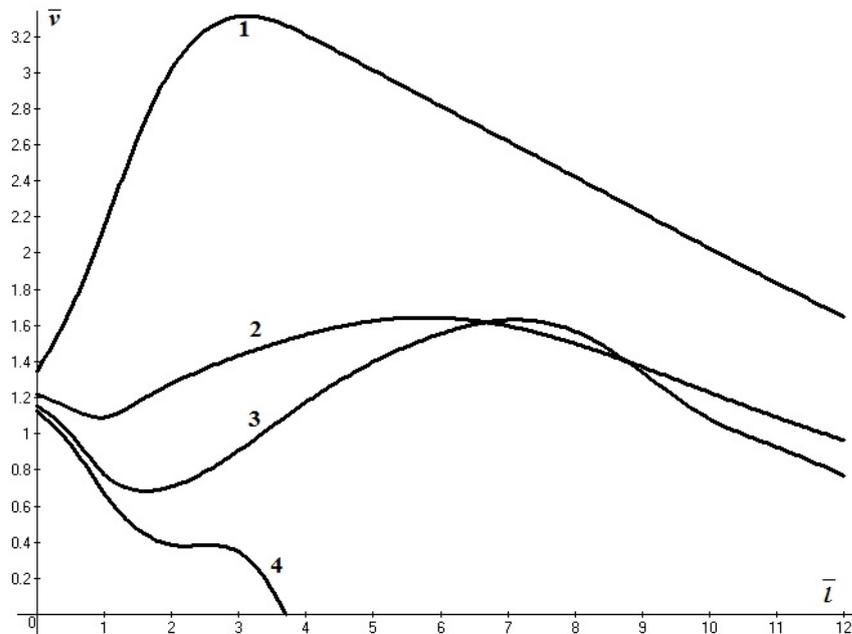


Рисунок 5.4. Зависимость скорости воздуха на оси отсоса от расстояния до него при:

1 - $\bar{r}_1 = 1,6$; $\bar{r}_2 = 1,8$; $\bar{v}_p = 21,7$; $\Delta\tau = 0,00094$; 1,6; $\bar{r}_2 = 2$; $\bar{v}_p = 10$; $\Delta\tau = 0,002$;

3 - $\bar{r}_1 = 1,6$; $\bar{r}_2 = 2,4$; $\bar{v}_p = 4,5$; $\Delta\tau = 0,0044$; 4 - $\bar{r}_1 = 1,6$; $\bar{r}_2 = 3$; $\bar{v}_p = 2,24$; $\Delta\tau = 0,009$

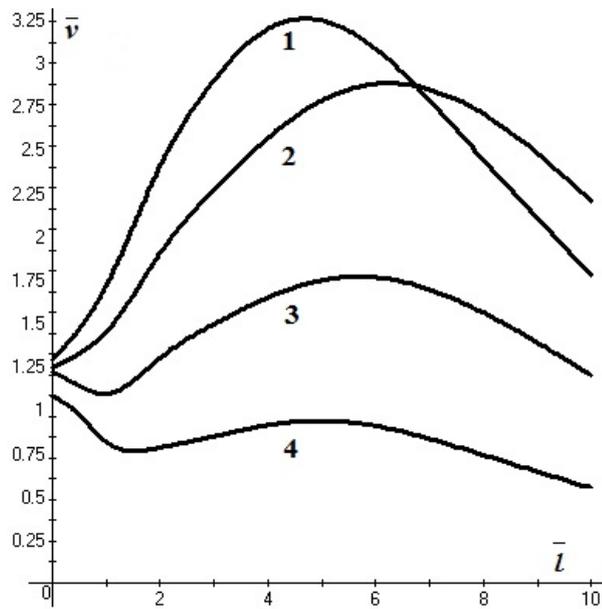


Рисунок 5.5. Зависимость осевой скорости от удалённости до всасывающего проёма при $\bar{r}_1 = 1,6$ и $\bar{r}_2 = 2$: 1 - $\bar{v}_p = 20$; 2 - $\bar{v}_p = 15$; 3 - $\bar{v}_p = 10$; 4 - $\bar{v}_p = 5$

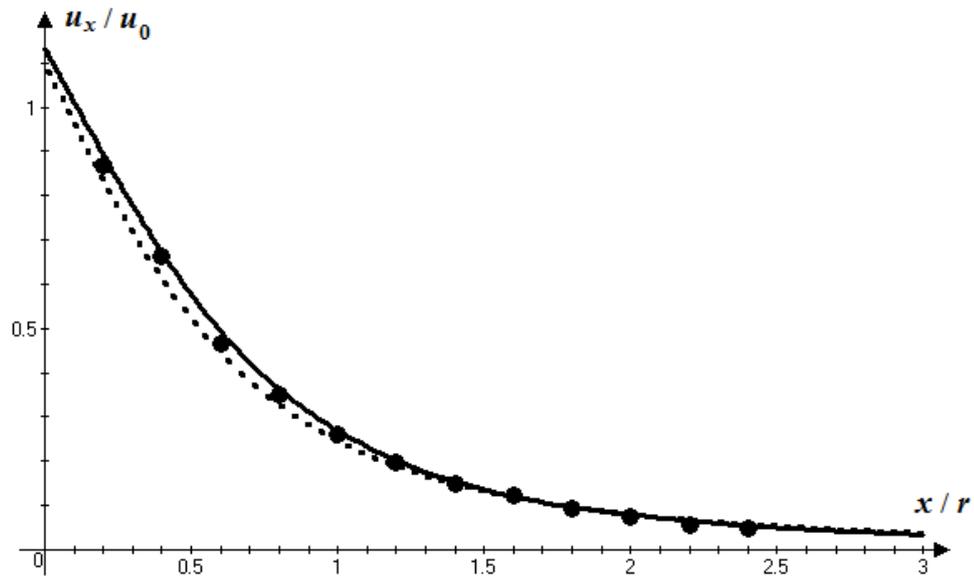


Рисунок 5.6. Сравнение расчетов по методу дискретных вихрей с экспериментом J. Alden [95] и кривой В.Н. Посохина [2]

Без действия отсоса проведены расчёты профилей осевой составляющей скорости вблизи кольцевой приточной струи при $R_0 = r_2 = 43,5\text{мм}$, скорости истечения приточной струи $u_0 = 6,48\text{ м/с}$ (рисунок 5.7), исследовавшийся экспериментально [125]. Расчёты при помощи МДВ производились при шаге по

времени 0,0015 и расстоянии между соседними вихрями 0,005. Расчёты в ANSYS-FLUENT более подробно описаны в следующем параграфе. Картина течения представлена на рисунке 5.7 в, величины скорости безразмерны и отнесены к u_0 .

Визуальное сравнение полученных профилей осевой составляющей скорости (рисунок 5.8) указывает на их удовлетворительное согласование. Коэффициенты корреляции $r \pm dr$ для МДВ (таблица 5.1) в основном высокие по шкале Чеддока, по методам SST, SST-CC – очень высокие. Значение критериев t Стьюдента демонстрируют хорошие совпадения средних значений с экспериментом. Разброс относительно среднего, вычисленного с помощью критерия Фишера F в одном случае для МДВ выпадает за критическое значение.

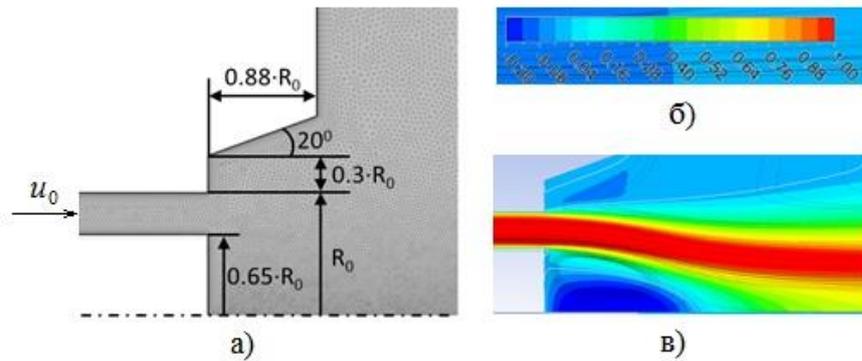


Рисунок 5.7. Расчёты в ANSYS-FLUENT: а – размеры области; б – шкала величин скорости; в – картина течения

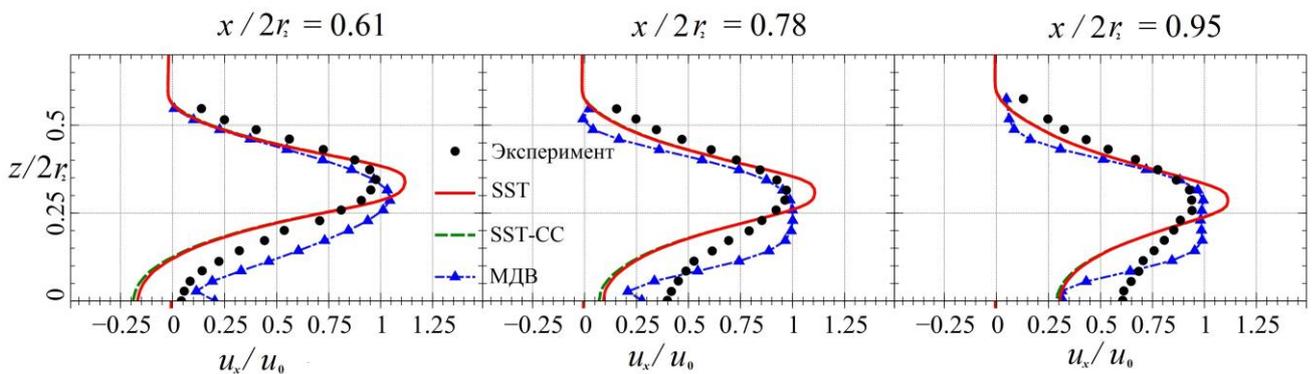


Рисунок 5.8. Сравнение экспериментальных данных [125] с расчётами разными методами

Таблица 5.1

Сравнение расчётных и экспериментальных величин продольной составляющей скорости u_x/u_0

u_x/u_0	$x/(2r)$	N	$r \pm dr$	t	F
SST	0,61	20	0,99±0,004	0,75	1,65
SST_CC	0,61	20	0,99±0,004	0,75	1,67
МДВ	0,61	20	0,87±0,055	0,56	1,11
SST	0,78	20	0,97±0,013	1,10	2,04
SST_CC	0,78	20	0,97±0,013	1,08	2,06
МДВ	0,78	20	0,89±0,045	0,37	2,28
SST	0,95	20	0,93±0,028	0,97	1,85
SST_CC	0,95	20	0,93±0,028	0,95	1,88
МДВ	0,95	20	0,93±0,029	0,60	2,40
SST	2,16	12	0,96±0,023	0,22	1,12
SST_CC	2,16	12	0,96±0,025	0,21	1,15
МДВ	2,16	12	0,85±0,079	0,58	1,75
SST	2,45	13	0,96±0,021	0,06	1,16
SST_CC	2,45	13	0,96±0,022	0,04	1,18
МДВ	2,45	13	0,80±0,100	0,53	1,64

При действии отсоса и приточной кольцевой струи расчёты при помощи МДВ производились при длине трубы 1 м; радиусе $r = 0,1$ м; $r_1 = 0,16$ м; $r_2 = 0,2$ м; внешнем радиусе трубы $R = 0,25$ м; скорости всасывания внутри трубы $v_0 = 1$ м/с; количестве круговых рамок равным 100; количестве отрезков в рамке 16; шаг дискретности 0,005 м; скорости притока v_p 5, 10 и 15 м/с. Шаг по времени вычислялся путем деления шага дискретности на скорость истечения струи и, соответственно, был равен: 0,001 с, 0,0005 с и 0,000067 с. Моделирование производилось до 1000-1300 временного шага. Вихри при этом заполняли расчётную область на удалении 10 калибров от входа в отсос, затем расчёт прекращался, и производилось ещё 200-400 шагов по времени, при этом скорость за эти шаги усреднялась. При помощи SST расчёты проводились при тех же геометрических параметрах, скоростях v_0 и v_p .

Характер изменения осевой скорости при расчётах разными методами имеет схожий характер (рисунок 5.9). Цифры 5, 10, 15 на рисунке обозначают безразмерные скорости истечения кольцевой струи.

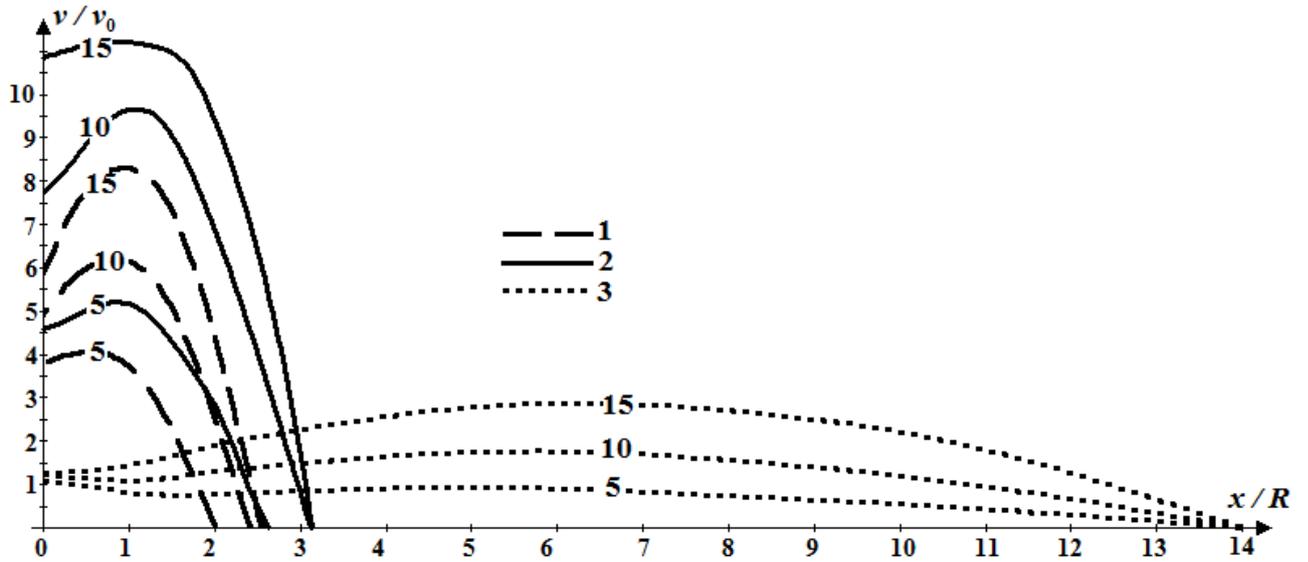


Рисунок 5.9 – Изменение скорости воздушного потока на оси отсоса в зависимости от расстояния до входа в отсос: 1 – расчёт методом SST при экранировании прямооточной воздушной струёй, 2 – расчёт при помощи МДВ при экранировании прямооточной воздушной струёй, 3 – расчёт методом SST при экранировании закрученной воздушной струёй

При удалении от входа во всасывающий канал скорость возрастает, достигает максимума, убывает и меняет свой знак. В последнем случае это означает, что кольцевая струя смыкается и далее воздух распространяется в противоположную от всасывающего канала сторону. Длина области, где воздушное экранирование кольцевой приточной струёй увеличивает скорость подтекания равна 2-2,5 калибра (калибр – радиус всасывающего канала) для расчетов методом SST. При расчётах по разработанной при помощи МДВ компьютерной программе [124] (приложение Б) оказалось, что длина этой области изменяется от 2,5 до 3 калибров. В случае закрутки струи с интенсивность 0,904 протяжённость данной области существенно увеличивается – до 14 калибров. Здесь расчёт производился методом SST, расчёт закрученной струи при помощи МДВ по данному алгоритму не возможен.

5.2. Численное моделирование течения вблизи круглого всасывающего канала, экранированного кольцевой закрученной струёй

Данный параграф посвящён исследованию экранирования всасывающего отверстия закрученными кольцевыми струями [125], где сказывается не только эффект экранирования, но и возникающая за счет закрутки кольцевой струи область возвратного течения, повышающая скорость подтекания воздуха к вытяжному устройству. Исследованию течений вблизи такого «вихревого отсоса» посвящены в основном экспериментальные работы [129,130-134] без использования современных программных комплексов вычислительной аэрогидромеханики. В силу особенностей проведения эксперимента, рассматривалось лишь ограниченное количество конфигураций, что не позволяет сделать однозначных выводов об особенностях течения в широком диапазоне параметров эксплуатации.

5.2.1. Разработка математической модели закрученной кольцевой струи

За основу разрабатываемой математической модели взяты уравнения Рейнольдса, замкнутые при помощи популярной модели турбулентности: переноса сдвиговых напряжений SST (Shear Stress Transport) [126], в том числе и с поправкой на кривизну и вращение (CC - Curvature Correction) [127], при этом все расчёты выполнены при помощи кода общего назначения программы ANSYS-FLUENT [128].

Для верификации разработанной математической модели рассматривалась закрученная кольцевая струя, экспериментальное исследование которой проводилось в работе [125] при числе Рейнольдса $Re = D_0 \cdot U_0 / \nu = 15000$ ($D_0 = 2 \cdot R_0$, где R_0 – внешний радиус кольцевого канала, схематическое изображение которого представлено на рисунке 5.10, U_0 – среднерасходная скорость в кольцевом канале, ν – кинематическая вязкость) и различных значениях закрутки

$S_0=0.0, 0.334, 0.5, 0.556, 0.904$. Здесь и далее, под величиной закрутки S_0 понимается следующее выражение:

$$S_0 = \frac{\int_{0.65R_0}^{R_0} \rho \cdot U \cdot W \cdot r^2 \cdot dr}{R_0 \cdot \int_{0.65R_0}^{R_0} \rho \cdot U \cdot W \cdot r \cdot dr}$$

В вышеуказанном соотношении ρ – плотность воздуха, а U и W – осевая и окружная компонента скорости соответственно.

На рисунке 5.10 изображены расчётная область и сетка (размер расчётной области и шаг сетки выбран на основе предварительной серии расчетов). Следует отметить, что в окружном направлении размер расчётной области составляет 15° . Начало координат расположено на пересечении осевой линии и плоскости, проходящей через выходное сечение кольцевого канала. Расчётная сетка состоит из приблизительно 8 миллионов ячеек, при этом для разрешения градиентов вблизи твёрдых стенок добавлены призматические слои с пристенным шагом выбранным так, чтобы условие $\Delta y^+ < 1$ выполнялось во всей области.

Граничные условия ставятся следующим образом (рисунке 5.10). На входе в кольцевой канал задаются U_0 , S_0 , и турбулентные характеристики, а на свободных границах – значение атмосферного давления P_0 , при этом, в зависимости от направления течения, турбулентные характеристики либо экстраполируются из расчётной области (выход), либо задаются равными значениям в невозмущённой среде (вход). Наконец, на стенках канала используется условие непроницаемости и прилипания, а в окружном направлении – условие периодичности.

Следует отметить, что для течения в кольцевой закрученной струе характерно явление гистерезиса [6-8], проявляющееся в реализации различной структуры течения в зависимости от предыстории изменения закрутки S_0 в кольцевом канале. Для воспроизведения данного явления в расчётах используются различные начальные поля закрутки со значением либо выше, либо ниже S_0 .

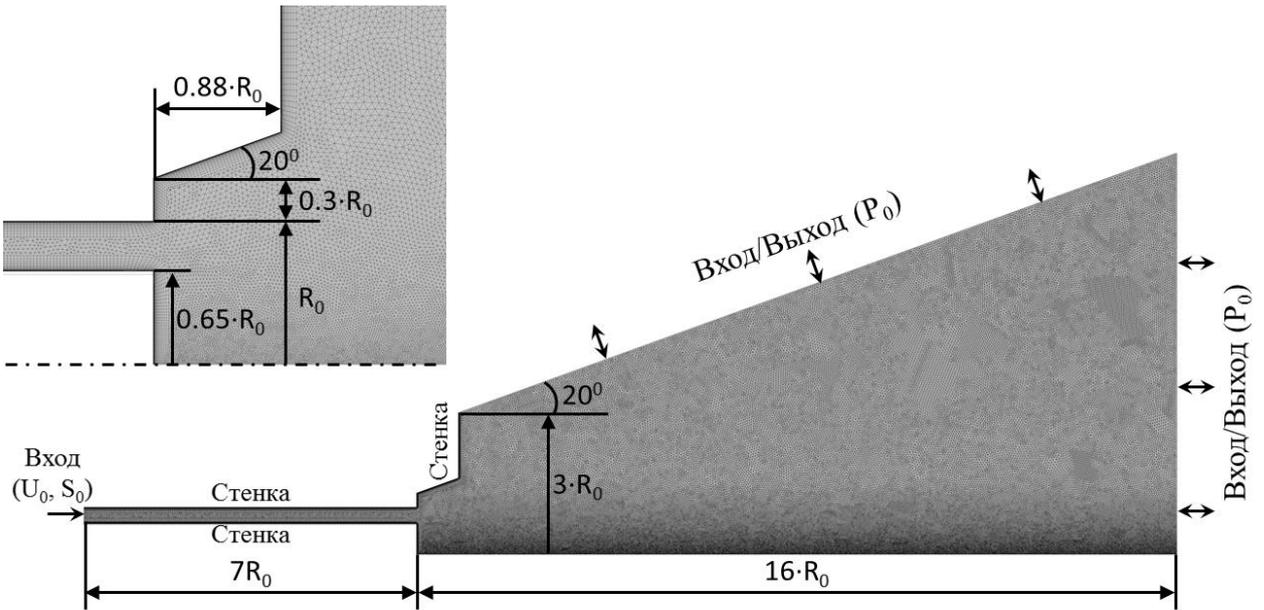


Рисунок 5.10 – Расчётная область и сетка для задачи о закрученной кольцевой струе

Для анализа влияния закрутки кольцевой струи на структуру течения на рисунке 5.11 показаны, полученные при помощи SST-CC модели, контуры осевой (U/U_0) и окружной (W/U_0) скорости, а также линии тока. Видно, что при $S_0=0$, $S_0=0.335$ и $S_0=0.556$ из-за расширения потока при выходе в окружающую среду образуется рециркуляционная зона в непосредственной близости от вытяжного устройства, при этом, по мере увеличения закрутки, ее размер уменьшается. Кроме того, при $S_0=0.335$ и $S_0=0.556$ вниз по течению образуется вытянутая в осевом направлении рециркуляционная зона, размер которой увеличивается с увеличением закрутки. При дальнейшем увеличении закрутки ($S_0=0.904$) две вышеупомянутые рециркуляционные зоны объединяются в одну, большего размера, вытесняя основной поток к наклонной стенке канала и образуя интенсивные обратные токи вблизи оси. Наконец, при уменьшении закрутки до значения $S_0=0.5$, кольцевая струя полностью «прилипает» к стенке канала и во всей области наблюдается возвратное движение (в следствие явления гистерезиса структура течения при $S_0=0.5$ существенно отличается от структуры при $S_0=0.556$).

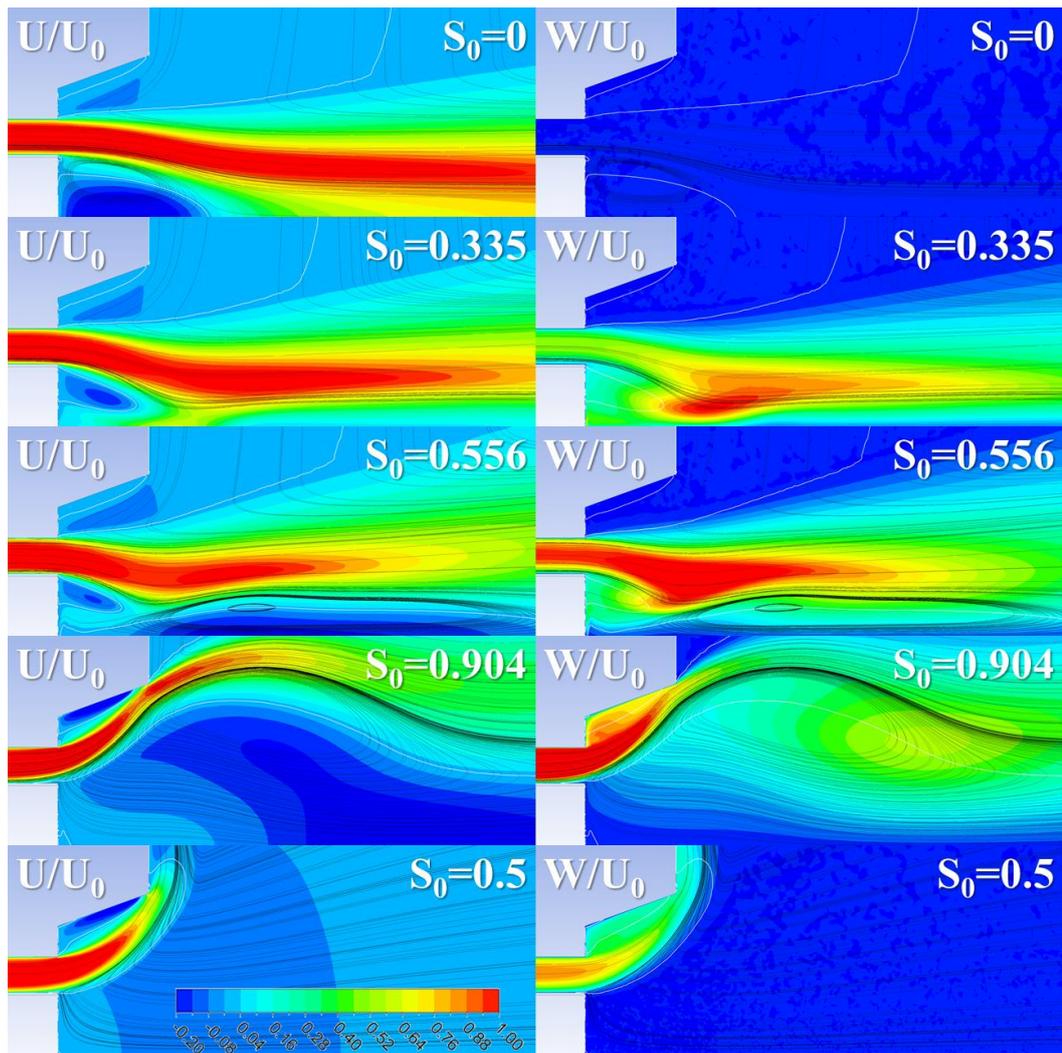


Рисунок 5.11. – Контуры осевой (U/U_0) и окружной (W/U_0) скорости и линии тока при различной закрутке кольцевой струи

Оценка точности предсказания возвратного течения с использованием рассматриваемых моделей турбулентности производится путем сравнения с экспериментальными данными распределений скорости на оси (рисунок 5.12).

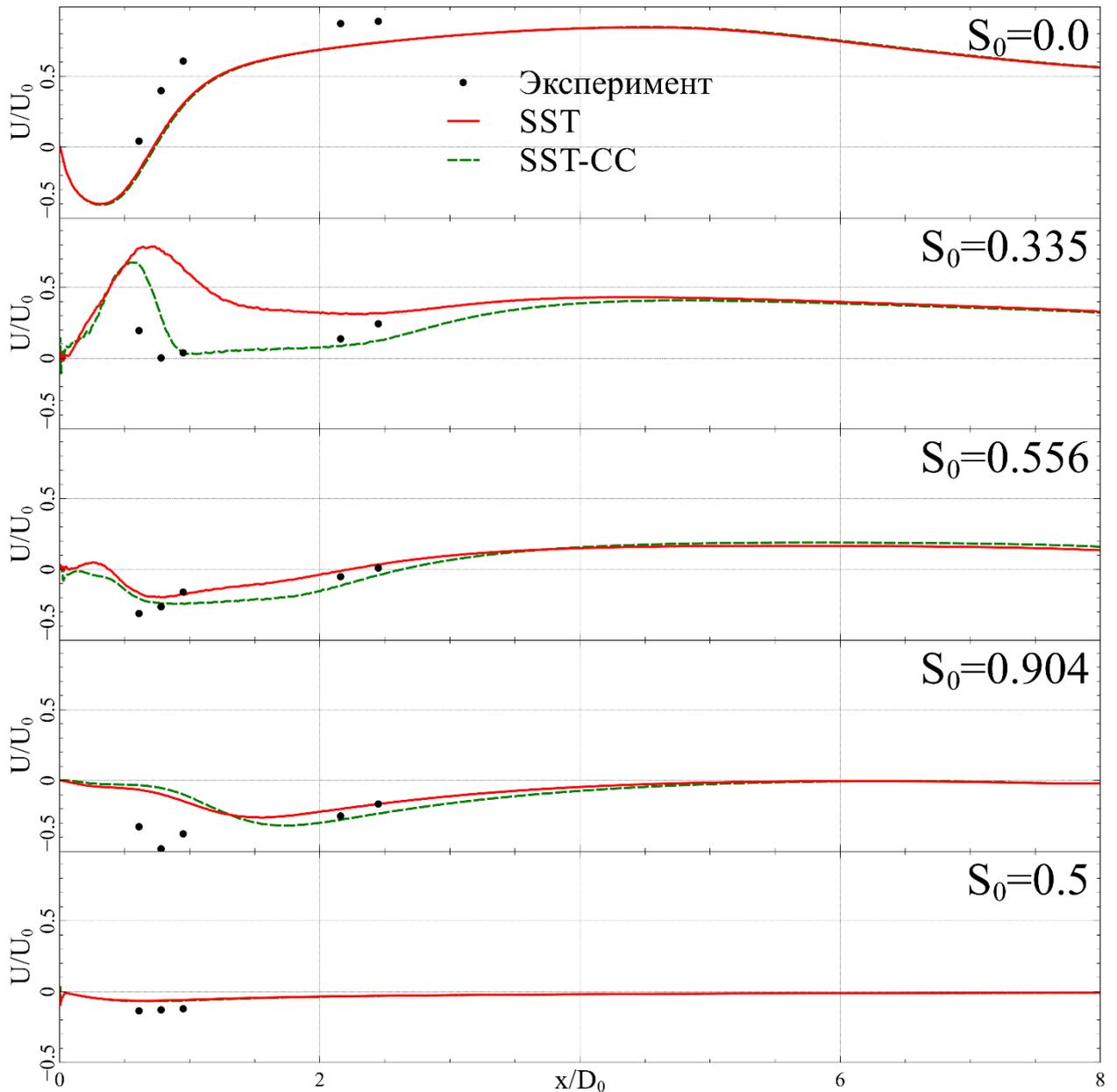


Рисунок 5.12 – Сравнение с экспериментальными данными осевых распределений скорости (U/U_0) при разных величинах закрутки S_0

Видно, что для $S_0 = 0$ и $S_0 = 0.5$ разница между моделями практически отсутствует, при этом наблюдается приемлемое согласие с экспериментальными данными. В тоже время, для $S_0 = 0.335$, $S_0 = 0.556$, и $S = 0.904$ применение поправки на кривизну и вращение (SST-CC) позволяет получить более близкие к экспериментальным осевые скорости.

Правильность воспроизведения течения вдали от оси оценивалась путем сравнения с экспериментальными данными радиальных профилей осевой (U/U_0) и

окружной (W/U_0) скорости (рисунок 5.13 и рисунок 5.14), полученных с использованием SST и SST-CC моделей (для случая $S_0=0$ также построены профили осевой скорости на основе метода дискретных вихревых колец [4]).

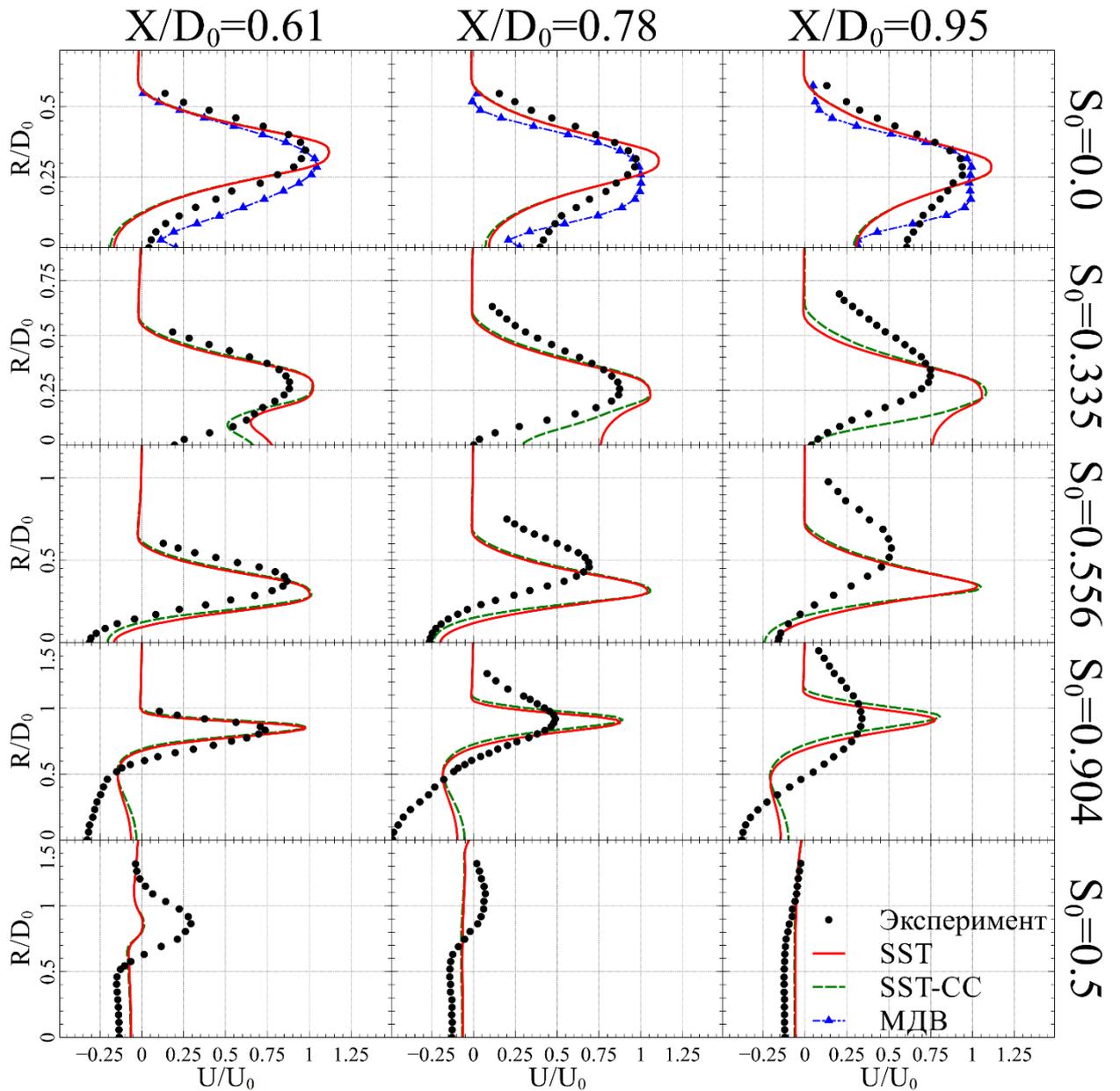


Рисунок 5.13 – Сравнение радиальных профилей осевой скорости (U/U_0) с экспериментальными данными в сечениях $X/D_0=0.61, 0.78, 0.95$

Наибольший эффект от поправки на кривизну и вращение наблюдается для профилей осевой скорости при $S_0=0.335$, в то время как для остальных рассмотренных значений закрутки ее эффект оказывается значительно меньшим,

хотя результаты SST-CC модели и оказываются ближе к эксперименту (аналогичные выводы можно сделать на основе сравнения профилей окружной скорости).

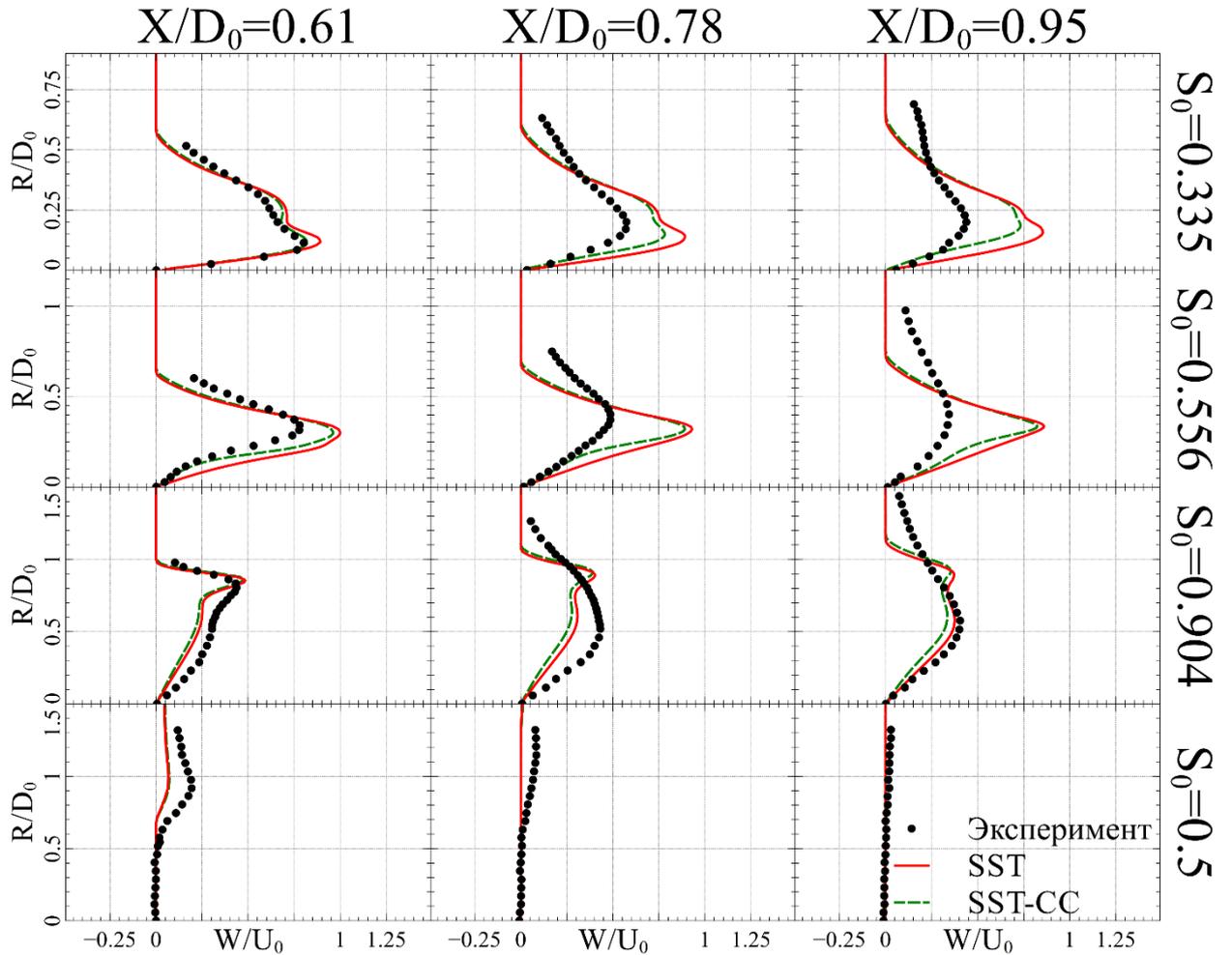


Рисунок 1.14 – Сравнение радиальных профилей окружной скорости (W/U_0) с экспериментальными данными в сечениях $X/D_0=0.61, 0.78, 0.95$

Количественное сравнение (таблицы 5.2 – 5.3) показало, что в 81% случаев наблюдается высокая корреляция расчётных и экспериментальных данных, при этом средние значения (критерий Стьюдента) близки в 83% случаев, а разброс величин относительно среднего (критерий Фишера) – в 57% случаев.

Сравнение расчетных и экспериментальных величин осевой составляющей скорости U/U_0

U/U_0	S_0	X/D_0	n	$r \pm dr$	t	F	χ^2
SST	0	0,61	20	0,991±0,004	0,747	1,652	1,065
SST_CC	0	0,61	20	0,991±0,004	0,750	1,670	2,205
SST	0	0,78	20	0,971±0,013	1,096	2,035	2,600
SST_CC	0	0,78	20	0,970±0,013	1,082	2,062	2,720
SST	0	0,95	20	0,934±0,028	0,972	1,848	1,395
SST_CC	0	0,95	20	0,935±0,028	0,947	1,884	1,484
SST	0	2,16	12	0,959±0,023	0,221	1,118	0,133
SST_CC	0	2,16	12	0,955±0,025	0,209	1,146	0,144
SST	0	2,45	13	0,962±0,021	0,063	1,16	0,133
SST_CC	0	2,45	13	0,959±0,022	0,038	1,183	0,138
SST	0,335	0,61	19	0,841±0,067	0,775	1,558	1,383
SST_CC	0,335	0,61	19	0,975±0,012	0,108	1,774	0,546
SST	0,335	0,78	23	0,835±0,063	0,063	0,583	1,59
SST_CC	0,335	0,78	23	0,968±0,013	0,005	1,788	4,7
SST	0,335	0,95	25	0,674±0,109	0,258	2,76	16,929
SST_CC	0,335	0,95	25	0,844±0,058	0,285	3,035	11,36
SST	0,335	2,16	23	0,890±0,043	0,12	1,99	1,06
SST_CC	0,335	2,16	23	0,970±0,012	0,762	2,29	2,42
SST	0,335	2,45	16	0,89±0,052	0,16	4,84	0,95
SST_CC	0,335	2,45	16	0,956±0,021	0,835	4,74	1,507
SST	0,5	0,61	25	0,906±0,036	1,71	27,33	31,8
SST_CC	0,5	0,61	25	0,912±0,034	1,90	18,74	8,12
SST	0,5	0,78	24	0,149±0,2	0,987	155,3	-24,91
SST_CC	0,5	0,78	24	0,778±0,081	1,66	53,08	-21,21
SST	0,5	0,95	24	-0,198±0,196	2,54	9,101	-0,65
SST_CC	0,5	0,95	24	0,881±0,045	0,719	11,997	-0,120
SST	0,556	0,61	22	0,972±0,012	0,014	1,083	0,641
SST_CC	0,556	0,61	22	0,974±0,011	0,016	1,169	0,776
SST	0,556	0,78	27	0,846±0,061	0,429	1,365	3,28
SST_CC	0,556	0,78	27	0,820±0,07	0,442	1,531	5,233
SST	0,556	0,95	19	0,725±0,061	0,67	2,318	-23,31
SST_CC	0,556	0,95	19	0,690±0,120	0,665	2,602	-4,836
SST	0,556	2,16	20	0,874±0,053	2,033	1,708	-1,546
SST_CC	0,556	2,16	20	0,993±0,032	1,335	1,969	2,858
SST	0,556	2,45	21	0,809±0,075	2,69	2,95	-2,044
SST_CC	0,556	2,45	21	0,979±0,089	1,56	3,28	-1,44
SST	0,904	0,61	26	0,908±0,035	0,037	1,024	-2,673
SST_CC	0,904	0,61	26	0,885±0,043	0,009	1,004	3,432
SST	0,904	0,78	33	0,793±0,065	0,005	1,132	-18,25
SST_CC	0,904	0,78	33	0,797±0,064	0,019	1,119	-19,157
SST	0,904	0,95	26	0,763±0,082	0,689	1,493	5,585
SST_CC	0,904	0,95	26	0,623±0,113	0,108	2,173	-6,222
SST	0,904	2,16	26	0,964±0,014	0,303	1,2172	15,12
SST_CC	0,904	2,16	26	0,975±0,010	0,440	1,529	41,28
SST	0,904	2,45	27	0,976±0,009	0,279	1,622	0,584
SST_CC	0,904	2,45	26	0,965±0,013	0,344	2,023	0,768

**Сравнение расчетных и экспериментальных величин окружной
составляющей скорости W/U_0**

W/U_0	S_0	X/D_0	n	$r \pm dr$	t	F	χ^2
SST	0,335	0,61	19	0,962±0,017	1,438	1,226	0,562
SST_CC	0,335	0,61	19	0,895±0,046	1,008	1,094	0,561
SST	0,335	0,78	23	0,994±0,002	2,665	2,29	1,289
SST_CC	0,335	0,78	23	0,961±0,016	2,364	1,846	1,044
SST	0,335	0,95	25	0,979±0,008	3,382	4,94	1,768
SST_CC	0,335	0,95	25	0,928±0,028	3,333	3,792	1,536
SST	0,335	2,16	23	0,888±0,045	1,248	4,077	1,568
SST_CC	0,335	2,16	23	0,885±0,046	1,603	4,823	1,950
SST	0,335	2,45	16	0,915±0,040	4,41	6,52	0,949
SST_CC	0,335	2,45	16	0,894±0,050	4,228	5,288	0,790
SST	0,5	0,61	25	0,795±0,074	1,438	7,333	1,048
SST_CC	0,5	0,61	25	0,694±0,104	1,819	10,115	1,179
SST	0,5	0,78	24	0,455±0,162	6,09	3,304	1,01
SST_CC	0,5	0,78	24	-0,0195±0,20	7,357	12,130	1,155
SST	0,5	0,95	24	0,589±0,133	15,66	2,138	1,681
SST_CC	0,5	0,95	24	0,370±0,176	0,370	1,518	1,730
SST	0,556	0,61	22	0,989±0,005	0,420	1,109	0,133
SST_CC	0,556	0,61	22	0,988±0,005	0,403	1,169	0,151
SST	0,556	0,78	27	0,963±0,015	1,153	2,760	0,669
SST_CC	0,556	0,78	27	0,955±0,019	1,186	2,916	0,642
SST	0,556	0,95	19	0,647±0,133	0,918	1,530	5,46
SST_CC	0,556	0,95	19	0,654±0,131	1,093	1,496	5,250
SST	0,556	2,16	20	0,409±0,186	0,149	1,540	1,090
SST_CC	0,556	2,16	20	0,777±0,085	1,607	1,981	0,451
SST	0,556	2,45	21	0,379±0,187	0,267	2,212	0,955
SST_CC	0,556	2,45	21	0,751±0,095	1,997	2,985	0,476
SST	0,904	0,61	26	0,853±0,053	1,853	1,173	1,175
SST_CC	0,904	0,61	26	0,771±0,080	2,212	1,115	1,880
SST	0,904	0,78	33	0,788±0,066	2,602	1,171	2,489
SST_CC	0,904	0,78	33	0,634±0,104	2,845	1,635	2,816
SST	0,904	0,95	26	0,902±0,036	1,232	1,297	-10,38
SST_CC	0,904	0,95	26	0,862±0,050	1,142	1,299	0,602
SST	0,904	2,16	26	0,943±0,021	0,154	1,930	4,685
SST_CC	0,904	2,16	26	0,971±0,011	0,815	2,171	0,693
SST	0,904	2,45	27	0,942±0,022	0,904	2,243	0,3329
SST_CC	0,904	2,45	27	0,980±0,008	0,645	1,226	0,100

Следует отметить, что среди рассмотренных конфигураций наиболее интенсивные обратные токи наблюдаются при $S_0=0.556$ и $S_0=0.904$, в то время как при $S_0=0.5$ происходит более равномерный забор воздуха во всей расчётной области, хотя и с меньшей интенсивностью.

Таким образом, на основе проведённых исследований показано, что использование поправки на кривизну и вращение (SST-CC) позволяет получить более точное решение, приемлемо согласующееся с экспериментальными данными, что и обуславливает применение данной модели для последующих исследований.

5.2.2. Оценка эффекта экранирования закрученной кольцевой струёй на зону действия круглого вытяжного канала

Для исследования изменения зоны действия вытяжного устройства в зависимости от закрутки течения рассмотрена аналогичная рассмотренной ранее конфигурация кольцевой струи, для которой вблизи оси добавлен круглый вытяжной канал диаметром $D_S=2\cdot R_S$ (рассматриваются два значения $D_S/D_0=0.23$ и $D_S/D_0=0.46$).

На рисунке 5.15 представлено изображение расчётной области и сетки, а также используемые граничные условия.

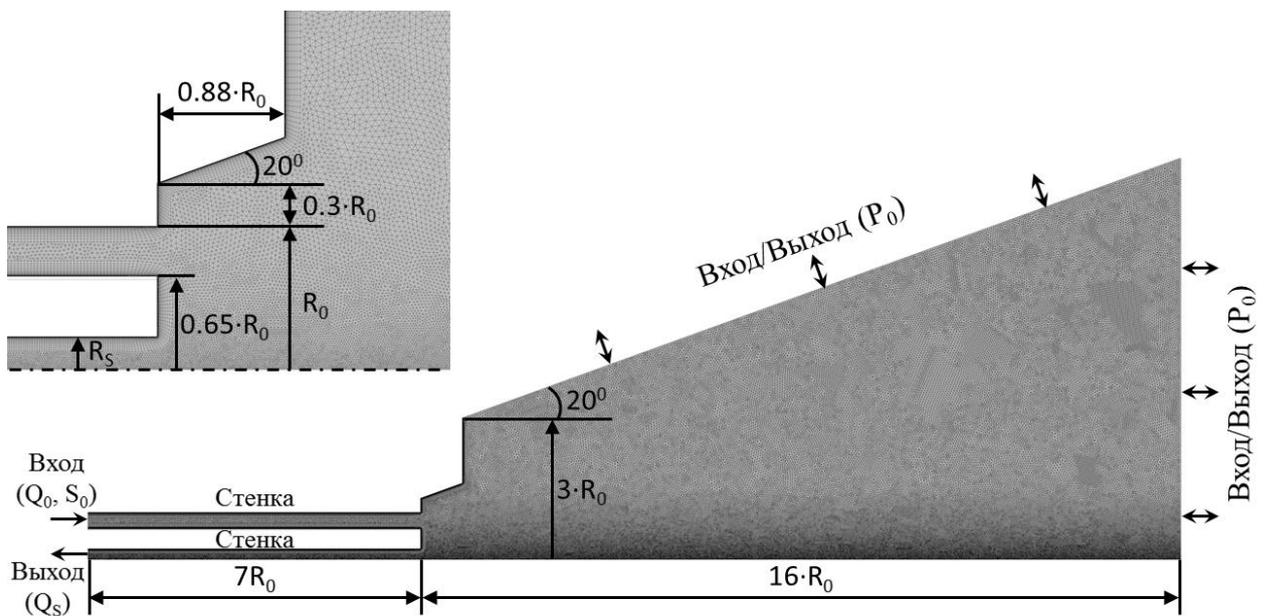


Рисунок 5.15. Расчётная область и сетка для задачи о круглом вытяжном канале, экранированного закрученной кольцевой струёй

В дополнение к описанным в предыдущем разделе граничным условиям на выходе из круглого канала задаётся значение массового расхода Q_S (рассматривается два значения $Q_S/Q_0=0.5$ и $Q_S/Q_0=1.0$, при этом значение Q_0 соответствует среднерасходной скорости U_0).

Кроме того, для возможности демонстрации преимущества экранирования закрученной кольцевой струёй также рассматривается конфигурация из одного круглого вытяжного канала без экранирования.

На рисунках 5.16 и 5.17 представлены поля осевой компоненты скорости (U/U_0) для соотношений расходов $Q_S/Q_0=0.5$ и $Q_S/Q_0=1.0$ в случае соотношения диаметров $D_S/D_0=0.23$ (для $D_S/D_0=0.46$ наблюдается схожая структура течения).

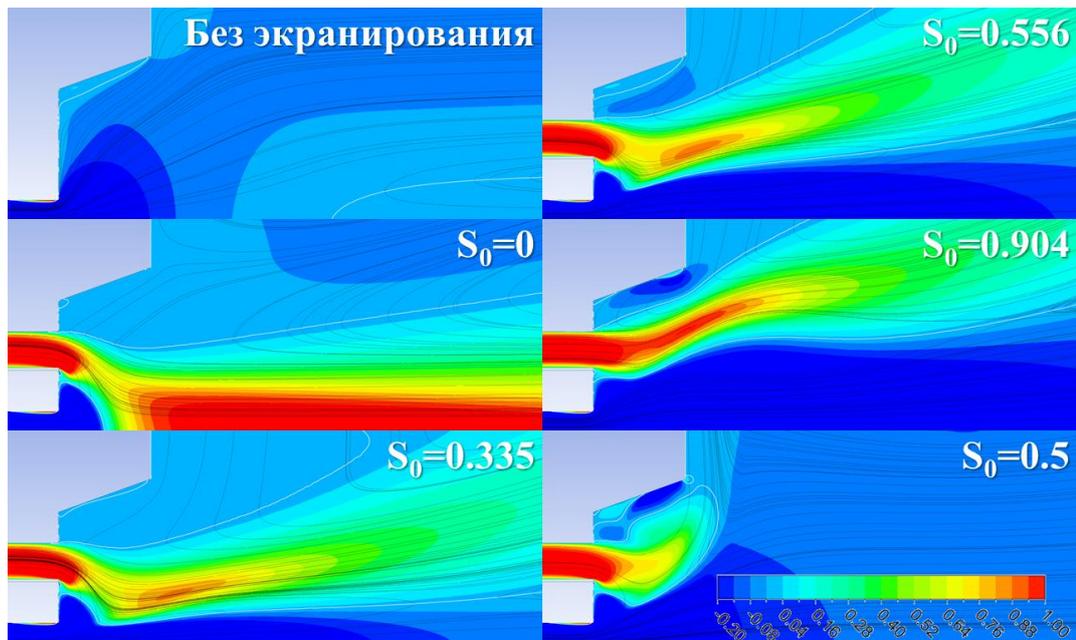


Рисунок 5.16 – Контурные осевой скорости (U/U_0) и линии тока при различной закрутке кольцевой струи для $Q_S/Q_0=0.5$ и $D_S/D_0=0.23$

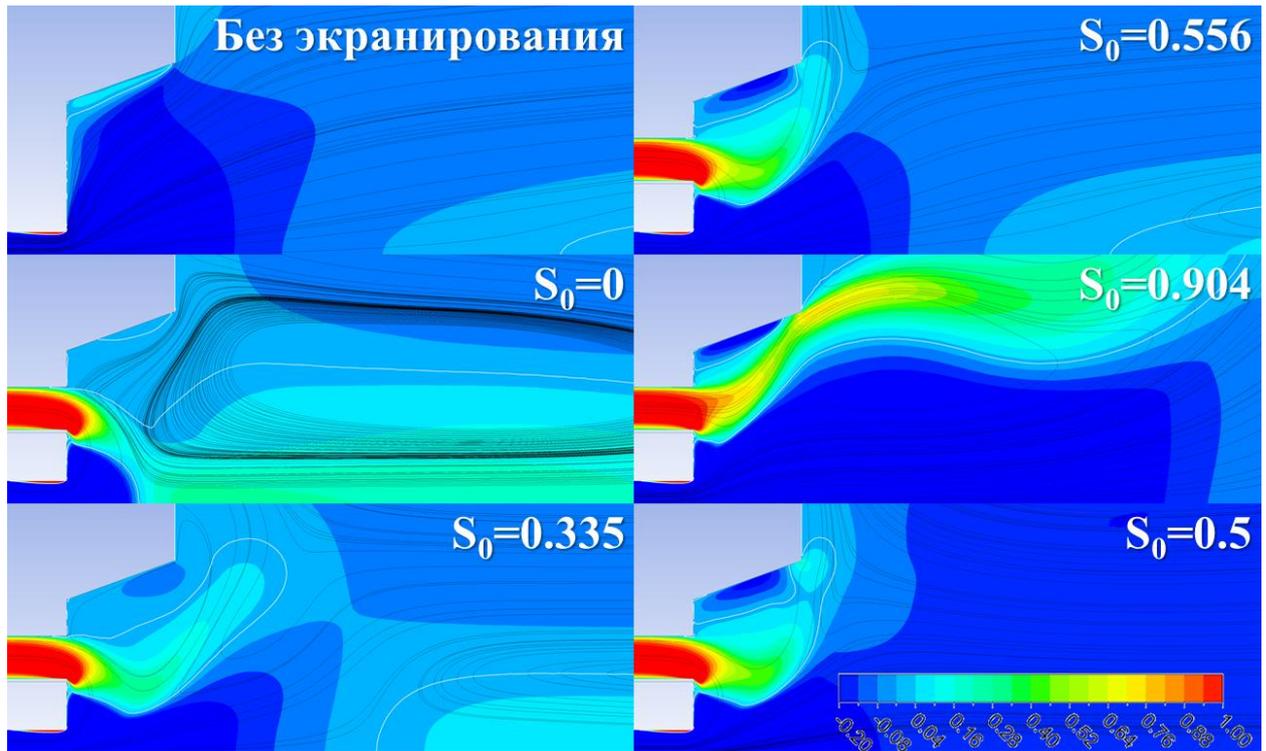


Рисунок 5.17 – Контуры осевой скорости (U/U_0) и линии тока при различной закрутке кольцевой струи для $Q_s/Q_0=1.0$ и $D_s/D_0=0.23$

Как видно, в случае отсутствия экранирования для обоих рассмотренных расходов происходит равномерный забор воздуха во всей расчётной области со сравнительно небольшой интенсивностью. При наличии кольцевой струи без закрутки ($S_0=0$) обратные токи наблюдаются лишь в непосредственной близости от вытяжного устройства, при этом размер рециркуляционной зоны лишь незначительно увеличивается при увеличении расхода. Для $S_0=0.335$ и $S_0=0.556$ структура течения оказывается схожей со структурой без круглого вытяжного канала при $Q_s/Q_0=0.5$, в то время как при $Q_s/Q_0=1.0$ кольцевая струя «прилипает» к стенке (по аналогии с $S_0=0.5$ на рисунке 5.1). Для $S_0=0.904$ и $S_0=0.5$ структура течения оказывается схожей для обоих значений расхода ($Q_s/Q_0=0.5$ и $Q_s/Q_0=1.0$), при этом для $S_0=0.904$ наблюдается весьма интенсивное обратное течение за счет формирования вытянутой в осевом направлении рециркуляционной зоны.

Аналогичные выводы можно сделать на основе анализа осевых распределений скорости для различных конфигураций вытяжного устройства (рисунок 5.18). Так, для $S_0=0$, обратные токи присутствуют только в

непосредственной близости от вытяжного устройства ($X/D_0 < 0.1$). Несколько лучшие результаты получены при $S_0=0.5$ и в случае конфигурации вытяжного устройства без экранирования, при этом для данных режимов интенсивность обратных токов лишь незначительно зависит от соотношения расходов Q_s/Q_0 .

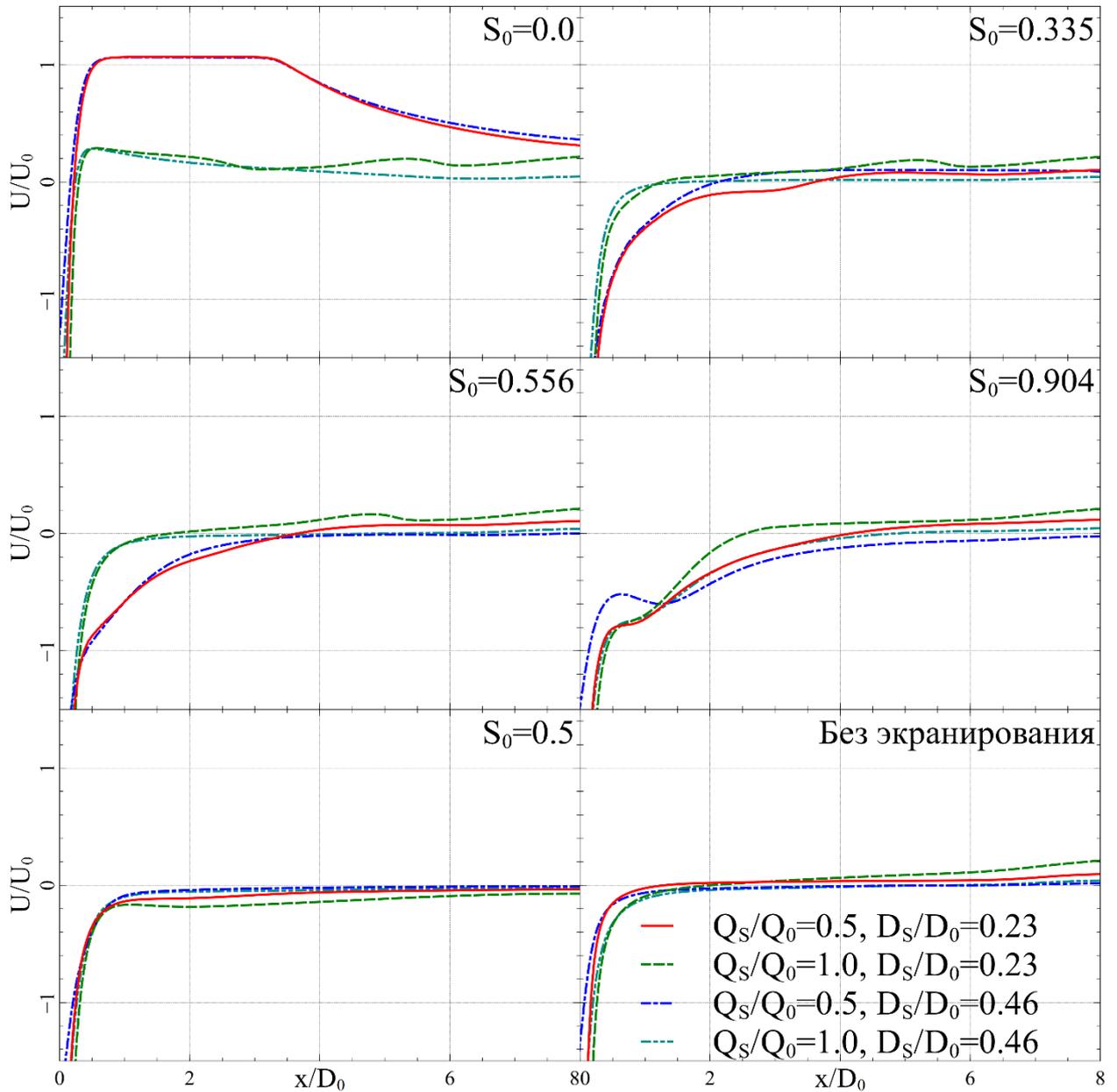


Рисунок 5.18 – Осевые распределения скорости (U/U_0) для различных значений закрутки экранирующей струи

Для $S_0=0.335$ и $S_0=0.556$ наиболее интенсивные обратные токи образуются при $Q_s/Q_0=0.5$, в то время как для $Q_s/Q_0=1.0$ эффективность вытяжного устройства

уменьшается. Следует отметить, что для всех вышеупомянутых режимов соотношения диаметров круглого и кольцевого канала (D_s/D_0) оказывает лишь незначительное влияние на зону действия вытяжного устройства.

Сравнение различных режимов работы вытяжного устройства показало (рисунок 5.19), что для всех рассмотренных конфигураций наиболее интенсивные обратные токи возникают при $S_0=0.904$ (по сравнению со случаем забора воздуха из рассматриваемой области без экранирования вытяжного канала длина рециркуляционной зоны воздуха увеличивается до 8 раз), при этом использование экранирования закрученной струей позволяет заметно улучшить эксплуатационные характеристики вытяжного устройства для всех рассмотренных закруток ($S_0=0.335, 0.556, 0.904, 0.5$).

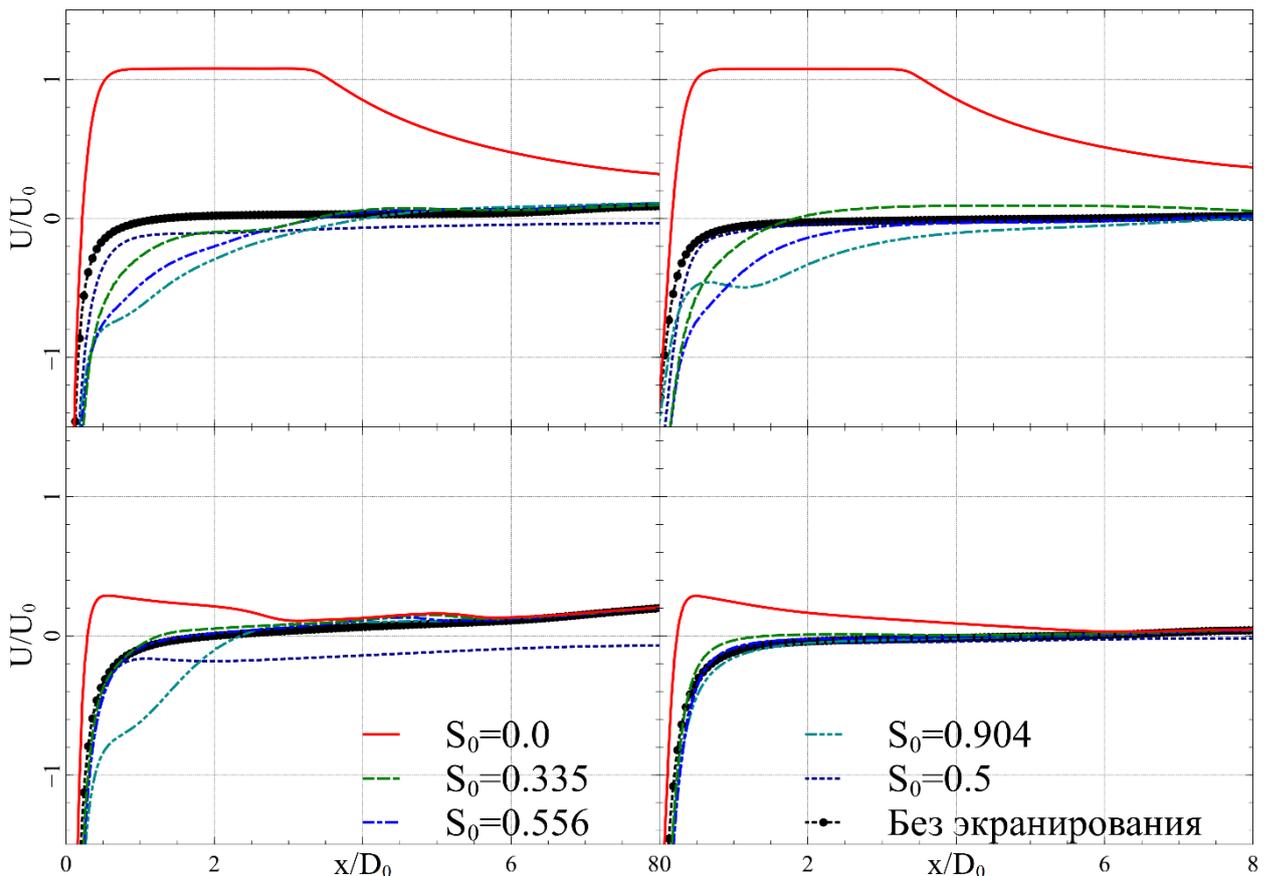


Рисунок 5.19. Осевые распределения скорости (U/U_0) для различных конфигураций экранирующей струи

Таким образом, экранирование круглого вытяжного канала кольцевой закрученной струёй позволяет значительно увеличить длину рециркуляционной зоны течения и скорость подтекающего к вытяжному отверстию воздуха для всех рассмотренных соотношений диаметров и расходов вытяжного и кольцевого канала.

ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ

1. При помощи дискретных вихревых рамок разработан метод расчета поля скоростей вблизи приточно-вытяжного устройства. Путём проведения вычислительных экспериментов показано, что экранирование круглого отсоса только прямоточной кольцевой струёй позволяет значительно повысить скорость подтекающего к нему воздуха в небольшом диапазоне удаления от него. Закрутка струи позволяет увеличить длину этой области в несколько раз.

2. Разработана математическая модель вытяжного устройства при наличии экранирования закрученной кольцевой струёй на основе уравнений Рейнольдса и модели переноса сдвиговых напряжений. В результате проведённых расчетов выявлено, что использование поправки на кривизну и вращение позволяет улучшить точность предсказания осевых и окружных скоростей, при этом для всех рассмотренных значений закрутки наблюдается приемлемое согласие расчётных и экспериментальных профилей продольной и окружной составляющих скорости.

С использованием разработанной модели проведено численное исследование влияния закрученной кольцевой струи на длину рециркуляционной зоны воздушного течения вблизи вытяжного устройства в широком диапазоне эксплуатационных параметров, при этом выявлены следующие закономерности. Наиболее равномерный забор воздуха вдали от оси симметрии наблюдается при уменьшении закрутки до $S_0=0.5$ (в этом случае обратные токи происходят практически во всей расчётной области). Наиболее интенсивный забор воздуха вблизи оси имеет место при сильной закрутке ($S_0=0.904$), в случае отношения

расходов $Q_s/Q_0=0.5$ и соотношений диаметров $D_s/D_0=0.46$. Максимальная длина рециркуляционной зоны течения, возникающей при истечении кольцевой осесимметричной струи при выбранных значениях закрутки составляет более 8 калибров (калибр – внешний диаметр кольцевого отверстия), при этом по сравнению со случаем забора воздуха из рассматриваемой области, только из центрального вытяжного канала длина этой зоны увеличивается более чем в 8 раз. В тоже время, при равенстве расходов приточного и отсасываемого воздуха, влияние кольцевой струи оказывается меньшим, при этом также наблюдается увеличение длины рециркуляционной зоны для закрутки кольцевой струи равной $S_0=0.904$. Наконец, в случае отсутствия закрутки в кольцевой струе, обратные токи наблюдаются только в непосредственной близости от вытяжного канала, что приводит к заметно менее эффективному забору воздуха из окружающего пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача совершенствования методов расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа, позволяющих определять границы отрывной области и поле скоростей с учётом набегающего воздушного потока и непроницаемой плоскости, а также вблизи местного отсоса, экранированного кольцевой воздушной струёй при разной степени ее закрутки.

Основные выводы по работе

1. Разработан метод расчета пылевоздушных потоков вблизи местного вентиляционного отсоса-раструба, расположенного над непроницаемой плоскостью. Определены закономерности изменения коэффициентов улавливания для пылевых частиц разных диаметров. Показано, что наиболее эффективный захват пылевых частиц производится местным вентиляционным отсосом - раструбом с углом раскрытия равным 180° . Для такого отсоса-раструба построены области аспирации при различных длинах раструба и удалённости от непроницаемой плоскости. На основании вычислительных экспериментов, произведённых по разработанной компьютерной программе, определены характерные размеры отрывной области на входе в сток-раструб, расположенный над непроницаемой плоскостью. Предложена аналитическая формула для определения линии отрыва на входе в раструб с углом раскрытия 180° , расположенный над непроницаемой плоскостью, профилирование по которой позволит улучшить акустические и аэродинамические свойства местного отсоса-раструба. Введён критерий эффективности местного отсоса-раструба, названный коэффициентом улавливания пылевой частицы, равный отношению объёма аспирации отсоса-раструба к объёму аспирации круглого всасывающего патрубка.

2. Усовершенствован метод расчета отрывного воздушного течения вблизи всасывающего патрубка при наличии набегающего потока, который позволяет строить адекватное поле скоростей воздушного потока, предельные траектории пылевых частиц и определять коэффициент аспирации. Произведён расчёт размеров отрывной области при разных скоростях и направлениях набегающего потока.

3. Разработан метод расчета отрывного воздушного течения вблизи отсоса-раструба с учётом набегающего потока. При помощи разработанной программы построены поля скоростей воздушного потока и траектории частиц пыли, определены коэффициенты аспирации при разных числах Стокса, скорости набегающего потока, размеров раструба.

4. На разработанной экспериментальной установке определены поля скоростей воздушного течения во всасывающем факеле отсоса-раструба и размеры отрывной области в отсосе при разных углах раскрытия и длинах раструба. Произведённое сравнение между экспериментально замеренными величинами скорости и размерами отрывной области с расчётными по разработанному вычислительному алгоритму и компьютерной программе показали высокую тесноту связи расчета и экспериментальными величинами, высокую степень достоверности и адекватности разработанной математической модели.

5. При помощи дискретных вихревых рамок разработана математическая модель и программа для расчета поля скоростей вблизи круглого отсоса, экранированного турбулентной струей, истекающей из кольцевого отверстия, охватывающего вытяжное отверстие. Путём проведения вычислительных экспериментов определены: размеры экранированного отсоса, способствующих увеличению зоны их действия: радиус внутреннего приточного кольца равный 1,6 калибра, его ширина равная 0,2-0,4 калибра; необходимое превышение скорости экранирующей воздушной струи над скоростью отсоса в диапазоне равном от 5 до 10 раз.

6. Разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование экранирования круглого отсоса закрученной кольцевой струёй при помощи уравнений Рейнольдса и моделей переноса сдвиговых напряжений, в том числе с поправкой на кривизну и вращение. Для возможности проведения расчетов была разработана оригинальная параметрическая модель данного течения, с использованием которой оказалось возможным выявить новые закономерности течения в закрученной кольцевой струе, что является необходимым условием для повышения эффективности систем местной вытяжной вентиляции. По сравнению со случаем забора воздуха из рассматриваемой области только из центрального всасывающего канала длина рециркуляционной зоны течения, способствующей увеличению скорости воздуха в области действия вытяжного устройства, увеличивается более чем в 4 раза.

Из проведённых исследований следуют **рекомендации** по использованию разработанных методов расчета местных вентиляционных отсосов в каждом конкретном случае их применения, профилированию входных проёмов вытяжных устройств по границам отрывных зон, выбору длины и угла наклона раструбов для наиболее эффективного улавливания загрязняющих веществ, использованию закрученных струйных течений для повышения эффективности местной вытяжной вентиляции.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в разработке и исследовании математических моделей трёхмерных отрывных пылевоздушных течений на входе в местные отсосы-раструбы в условиях сносящего воздушного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Посохин, В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В.Н. Посохин. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
2. Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.
3. Логачев, К.И. Аэродинамика всасывающих факелов / К.И. Логачев – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – 175 с.
4. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев , К.И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
5. Аверкова, О.А. Отрывные течения в спектрах вытяжных каналов / О.А. Аверкова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев. М.-Ижевск: ИКИ, 2012. – 288 с.
6. 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.
7. Батулин, В.В. Основы промышленной вентиляции / В.В. Батулин. – М.: Профиздат, 1990 – 448 с.
8. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
9. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.
13. Logachev, I.N. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova. – Boca Raton: CRC Press. – 576 p.
14. Logachev, I.N. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / I.N. Logachev, K.I. Logachev. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 417 p.
15. Посохин, В.Н. Местная вентиляция / В.Н. Посохин. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2005. – 72 с.
16. Шумилов, Р.Н. Теоретические основы вентиляции. Аэродинамика / Р.Н. Шумилов. – Екатеринбург: Уральский госуд. технич. ун-т, 1995. – 96 с.

17. Шумилов Р.Н. Проектирование систем отопления и вентиляции. Учебное пособие: в 2-х ч. Ч. 1. / Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 183с.

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

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

20. Логачев, К. И. Моделирование всасывающих факелов местных отсосов систем аспирации : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.03/ К. И. Логачев [Место защиты: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет]. – Белгород, 2001. – 330 с.

21. Пузанок, А.И. Численное моделирование вихревых нестационарных пылегазовых течений в системах местной вытяжной вентиляции [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.18 / А. И. Пузанок [Место защиты: Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского]. – Москва, 2006. – 167 с.

22. Зоря, В. Ю. Разработка методов и алгоритмов математического моделирования отрывных течений в замкнутых и разомкнутых областях с разрезами : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.18 / В. Ю. Зоря. ; [Место защиты: Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова], 2011 – Белгород, 2011. – 161 с.

23. Аверкова, О. А. Математическое моделирование пылевоздушных течений вблизи местных вентиляционных отсосов от вращающихся цилиндрических деталей : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.18 / О. А. Аверкова, 2008. – 156 с

24. Аверкова, О. А. Разработка и теоретическое обоснование методов расчета и конструирования систем местной обеспыливающей вентиляции : диссертация ...

доктора технических наук : 05.23.03 / О. А. Аверкова; [Место защиты: Волгогр. гос. архитектурно-строит. ун-т], Белгород. – 2015. – 320 с.

25. Ходаков, И.В. Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы местных вентиляционных отсосов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.03 / И.В. Ходаков ; [Место защиты: С. - Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т], Белгород, 2016. –160 с.

26. Гуревич, М.И. Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич. – Москва : Физматгиз, 1961. – 496 с.

27. 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.

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

29. Конышев, И.И. Воздушный поток к круглому отверстию в плоской стенке / И. И. Конышев, С. Д. Гуральник // Изв. ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 1972. – № 1. – С. 125-128.

30. Логачев, И.Н. Решение некоторых задач аэродинамики промышленной вентиляции методом электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) [Текст] / И.Н. Логачев, В.Г. Стеценко, Л.К. Саплинов // Вентиляция и очистка воздуха. – М.: Недра, 1969. – Вып. 5. – С. 144-149.

31. Конышев, И.И. Расчёт некоторых пространственных всасывающих факелов / И.И. Конышев, А.Г. Чесноков, С.Н. Щадрова // Изв. ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 1976. – № 4. – С. 103-116.

32. Flynn, M. R., The boundary integral equation method (BIEM) local exhaust hood flow fields / M. R. Flynn, C.T. Miller // AИHAJ. – 1989. – V.50, №5. – P. 281-288.

33. Гиль, Б.Л. Математическое моделирование с помощью ЭВМ всасывающих факелов местных отсосов, встроенных в оборудование / Б.Л. Гиль // Изв. ВУЗов. Стр-во и архитектура. – 1986. – № 7 – С. 90-93.

34. Лившиц, Г.Д. Исследование вытяжных факелов местных отсосов методом «особенностей» / Г. Д. Лившиц // Изв. ВУЗов. Стр-во и архитектура. – 1977. – № 4. – С. 113-119.

35. Лившиц, Г. Д. О расчёте всасывающих потоков местных отсосов / Г.Д. Лившиц // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. – 2005. – № 4. – С. 25-28.

36. Должиков, В. Н. Моделирование вентиляционных вытяжных устройств для процессов газотермической обработки материалов и изделий : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Должиков Виктор Николаевич; [Место защиты: Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т], 2007. – 16 с.

37. Фабрикант, Н. Я. Аэродинамика / Н. Я. Фабрикант. – М. : Наука, 1964. - 816 с.

38. Киреев, В. М. Совершенствование конструкций аспирационных укрытий с целью снижения запылённости при перегрузке формовочных масс в литейных цехах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.26.01 / В.М. Киреев; [Место защиты: Дон. гос. техн. ун-т], Белгород. – 2013. -203 с.

39. Минко, В.А. Укрытия мест пылевыделений / В.А. Минко, А.Б. Гольцов, В.М. Киреев. Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. -151 с.

40. Аверкова, О.А. Имитационное моделирование воздушных потоков при разгрузке вагонов в приемную воронку корпуса крупного дробления / О.А. Аверкова, К.В. Плотников, Е.И. Толмачева, Д.А. Емельянов, А.К. Логачев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 5. – С. 134-139.

41. Староверов, С.В. Совершенствование методики расчета систем централизованной вакуумной пылеуборки для литейных цехов предприятий машиностроения : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.26.01 / Дон. гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону. – 2005. - 23 с.

42. Староверов, С.В. Современные подходы к проектированию систем вакуумной пылеуборки / С.В. Староверов, А.Ю. Феоктистов, Ю.А. Феоктистов. Белгород :БГТУ. – 2013. – 162 с.

43. Лобода, А.В. Использование метода конформных отображений для определения полей скоростей воздушных потоков в задачах вентиляции / А.В. Лобода, С.Н. Кузнецов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 15-21.

44. Мелькумов В.Н. Математическое моделирование воздушных потоков в помещениях больших объёмов / В.Н. Мелькумов, А.В. Лобода, С.В. Чуйкин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 11-18.

45. Чуйкин, С. В. Разработка систем вентиляции и кондиционирования воздуха для крытых ледовых арен : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Чуйкин Сергей Владимирович; [Место защиты: Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т]. Воронеж. – 2013. – 18 с.

46. Фукс Б.А., Шабат Б.В. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения / Б.А. Фукс, Б.В. Шабат. – М.:Физматгиз. – 1959. – 376 с.

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

48. Посохин, В.Н. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба / В.Н. Посохин, Н.Б. Салимов, К.И. Логачев, А.М. Живов // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2002. – Сообщение 1. – № 8. – С.70–76.

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

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

51. 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.

52. Посохин, В.Н. О размерах отрывных зон на входе в отсос / В.Н. Посохин, А.Р. Фаттахов // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2006. – № 8. – С. 52–54.

53. Маклаков, Д. В. О форме свободной линии тока на входе в щелевидный сток / Д. В. Маклаков, В. Н. Посохин // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2004. – № 2. – С. 74–78.

54. Посохин, В.Н. О форме отрывных зон на входе в раструб / В.Н. Посохин, Н.Б. Салимов, Р.Г. Сафиуллин // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2003. – № 3-4. – С. 39–47.

55. Маклаков, Д.В. К расчёту бортовых отсосов. Сообщение 1 / Д.В. Маклаков, В.Н. Посохин, А.Р. Фаттахов // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2010. – № 3. – С. 73-79.

56. Маклаков, Д.В. К расчёту бортовых отсосов. Сообщение 2. О необходимой интенсивности двухуровневого бортового отсоса / Д. В. Маклаков, В. Н. Посохин, А. Р. Фаттахов // Изв. ВУЗов. – Строительство. – 2010. – № 5. – С. 40–45.

57. Аверкова, О.А. Математическое моделирование течения вблизи экранированного бортового отсоса / О.А. Аверкова, Д.Н. Крутикова, И.Н. Логачев и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 96-102.

58. Аверкова, О.А. Расчёт течения в спектре действия бортового местного вентиляционного отсоса / О.А. Аверкова, Д.Н. Крутикова, И.Н. Логачев и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 96-102.

59. Варсегова, Е.В. О форме отрывных зон на входе в щелевой всасывающий патрубок / Е.В. Варсегова, В.Н. Посохин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3. – С. 98-102.

60. Варсегова, Е.В. Об условиях предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом / Е.В. Варсегова, В.Н. Посохин // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2015. – № 11-12. – С. 18-22.

61. Посохин, В.Н. К расчёту потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 1 / В.Н. Посохин, А.М. Зиганшин Е.В. Варсегова // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2016. – № 4. – С. 66-73.

62. Посохин, В.Н. К расчёту потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 2. / В.Н. Посохин, А.М. Зиганшин Е.В. Варсегова // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2016. – № 5. – С. 63-70.

63. Посохин, В.Н. К расчёту потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 3. / В.Н. Посохин, А.М. Зиганшин Е.В. Варсегова // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2016. – № 6. – С. 58-65.

64. Хоперсков, А.В. Формирование нестационарных режимов при моделировании аспирационных течений: неустойчивость Кельвина-Гельмгольца / А.В. Хоперсков, В.Н. Азаров, С.А. Хоперсков, Е.А. Коротков, А.Г. Жумалиев // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2011. – № 1. – С. 151-155.

65. Хоперсков, А.В. Численное моделирование вентиляционных течений в промышленных помещениях / А.В. Хоперсков, Ю.В. Шафран, М.А. Бутенко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2. – С. 98-102.

66. Шафран, Ю.В. Программное обеспечение для оптимизации системы вентиляции крупных промышленных цехов / А.В. Хоперсков, Ю.В. Шафран, М.А. Бутенко, Н.М. Кузьмин, А.В. Хоперсков // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2014. – № 10. – С. 509-517.

67. Храпов, С.С. 4D-Модели в задачах экологического моделирования: проектирование информационной системы / С.С. Храпов, И.А. Кобелев, А.В.

Писарев, А.В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2011. – № 5. – С. 119-124.

68. Храпов, С.С. Компьютерное моделирование экологических систем / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, М. А. Еремин. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2010. – 124с.

69. Butenko, M. The optimization problem of the ventilation system for metallurgical plant / M. Butenko, Yu. Shafran, S. Khoperskov, V. Kholodkov, A. Khoperskov // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 167-172.

70. Шафран, Ю.В. Моделирование промышленных вентиляционных систем: проблема создания 3D-модели расчетной области / Ю.В. Шафран, А.В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2016. – № 2 (33). – С. 52--62.

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

72. 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.ХІІ, №1. - С.145-152.

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

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

75. 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.

76. Посохин, В.Н. Экспериментальное изучение вихревых зон в потоках вблизи всасывающих щелевых отверстий / В.Н. Посохин, М.В. Катков // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 2001. – № 1. – С.61–63.

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

78. Логачев, И.Н. Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, В.Ю. Зоря, О.А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2010. – Т.11, № 1. – С.43–52.

79. 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: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2010. – Т. 11, № 1. –С.68–77.

80. 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: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 160–167.

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

82. 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: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2011. – Т.12, № 2. – С. 213-219.

83. 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: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал).. – 2012. – Т.13, № 2. – С. 298-306.

84. Averkova, O. A. 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.

85. Ходаков, И.В. Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2016. – №3. – С. 6-12.

86. Averkova, O.A. Modeling Detached Flows at the Inlet to Round Suction Flues With Annular Screens / O.A. Averkova, I.N. Logachev, K.I. Logachev, I.V. Khodakov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2014. – 54(5). – P. 425-429.

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

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

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

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

91. Аверкова, О.А. 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.

92. Каменев, П.Н. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция / П.Н. Каменев. – М.: Гос. издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. – 1959. – 424с.

93. Фиалковская, Т.А. Вытяжные зонты и шкафы / Т.А. Фиалковская. – М.: Стройиздат. – 1947. – 67с.

94. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. под ред. Е.А.Штокман. / Е.А. Штокман, В.А. Шилов, Е.Е. Новгородский, И.И. Саввиди, Т.А. Скорик, В.В. Пашков. – М.: Изд-во АСВ. – 2001. – 688с.

95. Alden, J.L. Design of Industrial Ventilation System/ J.L. Alden, J.M. Kane. – Industrial Press. – 1982. – 280p.

96. 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.

97. Логачев, А. К. О методе численного моделирования отрыва потока на входе в круглый тонкостенный патрубок / А.К. Логачев [и др.] // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2016. – Т.17. – Выпуск 2. – С.189-196.

98. Логачев, А. К. Расчёт отрывной поверхности тока при входе в круглый всасывающий канал / А.К. Логачев [и др.] // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2016. – №4. – С.58-65.

99. Логачев, А.К. Математическое моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал / А.К. Логачев [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 7. – С. 128-135.

100. Логачев, А.К. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 1. Математическая модель и алгоритм ее компьютерной реализации / А.К. Логачев и др. // Новые огнеупоры. – 2015. № 12. – С.56-60.

101. Логачев, А.К. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 2. Характеристики отрывной области и эффективность улавливания пылевых частиц / А.К. Логачев и др. // Новые огнеупоры. – 2016. – № 2. – С.62-66.

102. Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 1.

Разработка математической модели и вычислительного алгоритма / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. ВУЗов. Строительство. – №9-10. – 2014. – С.56-64.

103. Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 2. Исследование параметров отрывной области / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. ВУЗов. Строительство. - № .11 - 2014. - С.30-38.

104. Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 3. Динамика пылевых частиц / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. ВУЗов. Строительство. - № 12. - 2014. С. 31-39.

105. Logachev, A.K. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation / A.K. Logachev [etc.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2016. – Vol. 56. – No 6. – P. 679-683.

106. Logachev, A.K. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 2. Characteristics of Separation Region and Efficiency of Capture of Dust Particles / A.K. Logachev [etc.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2016. – Vol. 57. – No 1. – P. 103-107.

107. Аверкова, О.А. Усредненные характеристики вихревых областей на входе в круглый сток-раструб / О.А. Аверкова, А.Э. Канар, Е.И. Толмачева, И.В. Ходаков // В сборнике: Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие. Электронное научное издание : сборник материалов Международной научно- практической интернет-конференции. ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». г. Ижевск. – 2014. – С. 162-167.

108. Аверкова, О.А. Моделирование воздушных течений на входе в местные вентиляционные отсосы в виде раструбов/ О.А. Аверкова, А.Э. Канар, Е.И. Толмачева // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2015. – №1. – С. 175-181.

109. Аверкова, О.А. О воздушном экранировании местного вентиляционного отсоса-раструба в неограниченном пространстве / О.А. Аверкова, А.Э. Канар, Е.И. Толмачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 3. – С.173-178.

110. Логачев, К. И. Численный расчет течения вблизи экранированного отсоса-раструба / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, Е. В. Селиванова // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2005. – № 6. – С.53–58.

111. Гоман О.Г. Метод дискретных вихрей в гидродинамике: основания и опыт использования// Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. Вип. 1, т. 1. – 1998. – С.21-29.

112. Wen, X.The numerical modelling of a two-dimensional local exhaust system associated with an inclined jet flow / X. Wen, D.B. Ingham, B. Fletcher // Journal of Engineering Mathematics. 2002. – V.4. – P. 367–384,.

113. Гоман, О.Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости. / О.Г. Гоман, В.И. Карплюк, М.И. Ништ М. и др.: Машиностроение. – 1993. – 288 с.

114. Логачев, К.И. Экологическая индустрия: Численное моделирование экранированных вытяжных устройств систем вентиляции промышленных предприятий / К.И. Логачев // Инженерная экология. – 1999. – № 5. – С. 30-40.

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

116. Справочник по специальным функциям. Под редакцией М.Абрамовица и И.Стиган. М.:Наука. – 1979. – 832с.

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

118. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1975 г. - 327 с.
119. Смыслов, В. В. Гидравлика и аэродинамика / В. В. Смыслов. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 336 с.
120. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
121. ГОСТ 24026–80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 18с.
122. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
123. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017614491 Российская федерация. Расчет отрывного пылегазового течения на входе в круглый патрубок в условиях внешнего набегающего потока / О.А. Аверкова, А.К. Логачев; заявитель и правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – №2017611573; заявл. 27.02.17; зарег. 18.07.17.
124. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017618651 Российская федерация. Моделирование течения в спектре приточно-вытяжного устройства / О.А. Аверкова, А.К. Логачев; заявитель и правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – №2017615461; заявл. 07.06.17; зарег. 07.08.17.
125. Vanierschot, M. Numerical study of hysteresis in annular swirling jets with a stepped-conical nozzle / M. Vanierschot, E. Van den Bulck // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2007. – Vol. 54. – P. 313-324.

126. Menter, F.R. Ten years of experience with the SST turbulence model / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – P. 625-632.

127. Smirnov, P.E. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term / P.E. Smirnov, F.R. Menter // Journal of Turbomachinery. – 2009. – Vol. 131, № 4. – P. 41010.

128. Mathur, S.R. A pressure-based method for unstructured meshes / S.R. Mathur, J.Y. Murthy // Numerical Heat Transfer. – 1997. – Vol. 32. – P. 195–215.

129. Penot, F. Experimental Study of Non-Isothermal Diverging Swirling and Non-Swirling Annular Jets with Central Aspiration / F. Penot, M. D. Pavlović // International Journal of Ventilation. – 2010. – Vol. 8 No 4. – P. 347-357.

130. Зайцев О.Н. Усовершенствование процессов удаления вредностей закрученными потоками от нефиксированных тепловых источников: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.04 Одесский национальный политехнический университет. Одесса. 1996. – 16с.

131. Зайцев, О.Н. Программа расчета взаимодействующих закрученных потоков для управления аэродинамикой котлов малой мощности / О.Н. Зайцев, Г.А. Илаев, С.Ю. Атрощенко // Строительство и техногенная безопасность. – j2016. – № 3. – С. 61-66.

132. Зайцев, О. Н. Системы локализации нестационарных тепловых источников на основе аэродинамики закрученных потоков / О. Н. Зайцев, С. Л. Донченко, В. В. Витюков. – Одесса : ТЕС. – 2006. – 181 с.

133. Зайцев, О. Н. Аэродинамика закрученных газовых потоков с прецессирующим вихревым ядром в теплоэнергетике / О. Н. Зайцев. – Симферополь : СОНАТ, 2009. – 204 с.

134. Ивенский, В.Г. Совершенствование систем аспирации на основе использования вихревого эффекта : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 11.00.11 Науч. центр. высшей школы / В.Г. Ивенский. – Ростов на Дону. 1991. – 19с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Листинг программы для ЭВМ расчета отрывного пылевоздушного течения вблизи круглого вытяжного патрубка в условиях внешнего набегающего потока

```

program mdv2;
{$mode objfpc}{$H+}
uses
  FileUtil, SysUtils;
const ku=11000; chag=0.000001 ;
type vektor=array[1..2]of real;
      matr=array[1..ku,1..ku]of real;
      mast=array[1..ku,1..2]of real;
      mass=array[1..ku]of real;
      dim=array[1..4]of real;
var  x, evn, {единичный вектор направления вдоль которого определяется скорость}
      Tkontr, Tvixr, ptochka, px, V, tp, xmax: vektor;
      d, h, b, kalibr, svG, svGSt, skor, skorx, dlina, max,
      c, M, S, db, al, rast, vsr, t, Ulov, Upala, sred, Sa, Va, Be, de, v0, ud, Vb, Vo, pdy, hsr, summa: real;
      i, j, k, n, Ns, Ns_, p, q, vn, R, l, n2, prop, otstup, kri, chet: integer;
      kt {массив контрольных точек},
      rv {массив координат присоединенных вихрей},
      sv, psv {массив координат вихрей, лежащих на свободной линии тока}: mast;
      kof {массив влияния на контрольные точки вихрей}, fok: matr;
      pr, prom: mass; {массив свободных членов СЛАУ для определения циркуляций присоединенных вихрей}
      circ: mass; {массив циркуляций присоединенных вихрей}
      y, ry: dim; {массив координат y[1], y[2] пылевой частицы и составляющих скорости гор. y[3] и верт y[4]}
      fl: text;
      vre: string;
function v2(x, k, n: vektor): real;
// функция влияния на точку x с координатами x[1], x[2]
// единичного кольцевого вихря, расположенного в точке k с координатами k[1], k[2]
// вдоль направления единичного вектора n с координатами n[1], n[2]
function EK(t: real): real;
var p: real;
begin
p:=1.38629436112+0.09666344259*(1-t)+0.03590092383*(1-t)*(1-t)+
0.03742563713*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.01451196212*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t)+
ln(1/(1-t))*(0.5+0.12498593597*(1-t)+0.06880248576*(1-t)*(1-t)+
0.03328355346*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.00441787012*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t));
EK:=p;
end;
function EE(t: real): real;
var p: real;
begin
p:=1+0.44325141463*(1-t)+0.06260601220*(1-t)*(1-t)+
0.04757383546*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.01736506451*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t)+
ln(1/(1-t))*(0.24998368310*(1-t)+0.09200180037*(1-t)*(1-t)+
0.04069697526*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.00526449639*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t));
EE:=p;
end;
var a, b, r, rh, a1, a2, t: real; s: vektor;
// a - дополнительная переменная, r - расстояние между точками
// rh - шаг дискретности
begin
b:=2*k[2]*x[2];
a:=sqrt(x[1]-k[1])+sqrt(k[2])+sqrt(x[2]);

```

```

A1:=k[2]*k[2]*n[1]/4/pi;
A2:=k[2]*((x[1]-k[1])*n[2]-x[2]*n[1])/4/pi;
r:=sqrt(sqrt(x[1]-k[1])+sqrt(x[2]-k[2]));
//writeln('r=',r:0:6);
//readln;
rh:=0.5*h;
if r<rh then {Если расстояние до вихря меньше шага дискретности}
  begin
    //v2:=0
    if r<0.000001 then v2:=0//v2:=1/4/pi*n[1]*(ln(8*k[2]/rh)-1/4)
    else
      begin
        s[1]:=rh/r*(x[1]-k[1])+k[1];
        s[2]:=rh/r*(x[2]-k[2])+k[2];
        a:=((s[1]-k[1])*n[2]-(s[2]-k[2])*n[1])/2/pi;
        v2:=((x[1]-k[1])*n[2]-(x[2]-k[2])*n[1])/2/pi/rh/rh;
      end;
    end
  else
    if abs(b)>0.0000001
      then
        begin
          t:=2*b/(a+b);
          // v2:=-n[1]/4/pi/sqrt(sqrt(x[1]-k[1])+sqrt(x[2]+k[2]))*
          // ((2-t)/(1-t)*EE(t)-2*EK(t)-k[2]/x[2]*t/(1-t)*EE(t))+
          // n[2]/4/pi*(x[1]-k[1])/x[2]/sqrt(sqrt(x[1]-k[1])+sqrt(x[2]+k[2]))*
          // ((2-t)/(1-t)*EE(t)-2*EK(t));
          // writeln(test);
          v2:=(A1*b+A2*a)*4/b/(a-b)/sqrt(a+b)*EE(t)-A2*4*EK(t)/b/sqrt(a+b);
          //writeln(test);
          //readln;
        end
      else
        v2:=k[2]*k[2]*n[1]/2/a/sqrt(a);
    end;
  procedure skorost(Tkontr,evn:vektor;var skor:real);
  //Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой вихрей
  var Tvixr:vektor; q:integer;
  begin
    skor:=0;
    //Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой присоединенных вихрей
    for q:=1 to N do
      begin
        Tvixr[1]:=pv[q,1]; Tvixr[2]:=pv[q,2];
        skor:=skor+circ[q]*v2(Tkontr,Tvixr,evn)
      end;
    //Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой свободных вихрей
    for q:=1 to Ns do
      begin
        Tvixr[1]:=sv[q,1]; Tvixr[2]:=sv[q,2];
        skor:=skor+svG*v2(Tkontr,Tvixr,evn);
      end;
    skor:=skor+evn[1]*Vb;
  end;
  {Шаг по линии тока против направления вектора скорости}
  procedure linchag2(var x:vektor);
  const ch=0.0001;
  var y,evn,ev:vektor; skr:real;
  begin
    evn[1]:=1; evn[2]:=0;
    y:=x;

```



```

ptochka[1]:=d*cos(al);
ptochka[2]:=B+(d)*sin(al);
k:=1;
i:=1;
repeat
kt[i,1]:=ptochka[1]-h/2*cos(al)-h*(k-1)*cos(al);
kt[i,2]:=ptochka[2]-h/2*sin(al)-h*(k-1)*sin(al);
pv[i,1]:=ptochka[1]-h*cos(al)*(k-1);
pv[i,2]:=ptochka[2]-h*sin(al)*(k-1);
{pv[i,1]:=ptochka[1]-h/2*cos(al)-h*(k-1)*cos(al);
pv[i,2]:=ptochka[2]-h/2*sin(al)-h*(k-1)*sin(al);
kt[i,1]:=ptochka[1]-h*cos(al)*(k-1);
kt[i,2]:=ptochka[2]-h*sin(al)*(k-1); }
writeln(i,' ',kt[i,1]:0:5,' ',kt[i,2]:0:5,' ',pv[i,1]:0:5,' ',pv[i,2]:0:5);
i:=i+1;
k:=k+1;
until abs(sqrt(sqr(pv[i-1,1]-ptochka[1])+sqr(pv[i-1,2]-ptochka[2]))-(kalibr))<0.0001;
// until abs(sqrt(sqr(kt[i-1,1]-ptochka[1])+sqr(kt[i-1,2]-ptochka[2]))-(kalibr))<0.0001;
N2:=i-1;
//дискретизация всасывающего проема
{ud:=-kalibr/2;
kt[i,1]:=ud; kt[i,2]:=b-h/2;
while kt[i,2]>0.0 do
begin
pv[i,1]:=ud;
pv[i,2]:=kt[i,2]-h/2;
writeln(i,' ',kt[i,1]:0:5,' ',kt[i,2]:0:5,' ',pv[i,1]:0:5,' ',pv[i,2]:0:5);
i:=i+1;
kt[i,1]:=ud;
kt[i,2]:=pv[i-1,2]-h/2;
end;
N:=i-1;} //количество контрольных точек
//дискретизация всасывающего проема
ud:=-kalibr/2;
kt[i,1]:=ud; kt[i,2]:=b-h/2;
while kt[i,2]>0.0 do
begin
pv[i,1]:=ud;
pv[i,2]:=kt[i,2]-h/2;
writeln(i,' ',kt[i,1]:0:5,' ',kt[i,2]:0:5,' ',pv[i,1]:0:5,' ',pv[i,2]:0:5);
i:=i+1;
kt[i,1]:=ud;
kt[i,2]:=pv[i-1,2]-h/2;
// readln;
end;
N:=i-1; //количество контрольных точек

//pv[N+1,2]:=0.000; pv[N+1,1]:=ud;
pv[N,1]:=kt[N2,1]-h/2; pv[N,2]:=kt[N2,2];
writeln('N=',N,' N2=',N2,' ',kt[N,1]:0:5,' ',kt[N,2]:0:5,' ',pv[N,1]:0:5,' ',pv[N,2]:0:5);
// readln;
//Формирование матрицы СЛАУ
for p:=1 to N do
for q:= 1 to N do
begin
Tkontr[1]:=kt[p,1]; Tkontr[2]:=kt[p,2];
Tvixr[1]:=pv[q,1]; Tvixr[2]:=pv[q,2];
if abs(pv[p,1]-Tkontr[1])<0.0000001 then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end
else
begin
evn[2]:= -(pv[p,1]-kt[p,1])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));

```

```

evn[1]:=(pv[p,2]-kt[p,2])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));
end;
if p=n then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end;
//writeln(p,' ,evn[1]:0:5,' ,evn[2]:0:5,' ,kt[p,1]:0:5,' , kt[p,2]:0:5,' ,pv[p,1]:0:5,' ,pv[p,2]:0:5);
//readln;
kof[p,q]:=v2(Tkontr,Tvixr,evn);
end;

for p:=1 to N do prom[p]:=kof[p,1]; //запоминаются начальные коэффициенты при первой неизвестной циркуляции -
точка схода с кромки
//writeln('kof[N,N]=' ,kof[4,3]:0:16);
//readln;
SvG:=-0.0; SvSt:=1;
while (abs(SvG-SvSt)>0.000001) do
BEGIN
for p:=1 to N do
begin
Tkontr[1]:=kt[p,1]; Tkontr[2]:=kt[p,2];
Tvixr[1]:=pv[q,1]; Tvixr[2]:=pv[q,2];
if abs(pv[p,1]-Tkontr[1])<0.0000001 then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end
else
begin
evn[2]:= -(pv[p,1]-kt[p,1])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));
evn[1]:=(pv[p,2]-kt[p,2])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));
end;
if p=n then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end;
if (p>=1)and(p<=N2) then pr[p]:=0 else pr[p]:=2*Vo*(1-Tkontr[2]*Tkontr[2]/B/B);
pr[p]:=pr[p]-evn[1]*Vb;
end;
//Учет свободных вихрей
for p:=1 to N do
begin
summa:=0;
for k:=1 to Ns do
begin
Tkontr[1]:=kt[p,1]; Tkontr[2]:=kt[p,2];
Tvixr[1]:=sv[k,1]; Tvixr[2]:=sv[k,2];
if abs(pv[p,1]-Tkontr[1])<0.0000001 then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end
else
begin
evn[2]:= -(pv[p,1]-kt[p,1])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));
evn[1]:=(pv[p,2]-kt[p,2])/sqrt(sqr(pv[p,1]-kt[p,1])+sqr(pv[p,2]-kt[p,2]));
//writeln(p,' ,evn[1]:0:5,' ,evn[2]:0:5,' ,kt[p,1]:0:5,' , kt[p,2]:0:5,' ,pv[p,1]:0:5,' ,pv[p,2]:0:5);
//readln;
end;
if p=n then begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0 end;
summa:=summa+v2(Tkontr,Tvixr,evn);
end;
kof[p,1]:=prom[p]+summa;
end;
// Решение системы уравнений
for i:=1 to n do
for j:=1 to n do fok[i,j]:=kof[i,j];
for k:=1 to n do
begin
max:=abs(FOK[k,k]);
R:=k;
for i:=k+1 to n do
if abs(FOK[i,k])>max then
begin
max:=abs(FOK[i,k]);

```

```

    R:=i;
  end;
  for j:=1 to n do
  begin
    C:=FOK[k,j];
    FOK[k,j]:=FOK[R,j];
    FOK[R,j]:=C
  end;
  C:=PR[k];
  PR[k]:=PR[R];
  PR[r]:=c;
  For i:=k+1 to N do
  begin
    M:=FOK[i,k]/FOK[k,k];
    For j:=k to N do
    FOK[i,j]:=FOK[i,j]-M*FOK[k,j];
    PR[i]:=PR[i]-M*PR[k];
    end;
  end;
end;
if FOK[N,N]=0 then
begin
  if PR[N]=0 then
  begin
    writeln(UTF8ToConsole('Система неопределена'));
    l:=2
  end
  else
  begin
    writeln(UTF8ToConsole('Система несовместна'));
    l:=1;
  end
end
else
begin
  CIRC[N]:=PR[N]/FOK[N,N];
  for i:=N downto 1 do
  begin
    S:=0;
    for j:=i+1 to N do
    S:=S+FOK[i,j]*CIRC[j];
    circ[i]:=(PR[i]-S)/FOK[i,i]
  end;
  l:=0;
end;
//writeln(pv[1,1]:0:5, ' ',pv[1,2]:0:5, ' zavixrennost na svobodn linii toka ',svG:0:5);
{for i:=1 to N do
writeln(' CIRC ',i, ' ',circ[i]:0:9);}
//readln;
svGSt:=svG; //старая циркуляция на свободной линии тока
svG:=circ[1];
writeln('SvG=',SvG);
for i:=1 to N do
begin
  if (i>=1)and(i<=N2) then begin evn[1]:=0; evn[2]:=1; end else begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0; end ;
  x[1]:=kt[i,1]; x[2]:=kt[i,2];
  skorost(x,evn,skor);
// writeln('x=',x[1]:0:5, ' ',x[2]:0:5, ' ',skor:0:8);
// readln;
end;
writeln('Ns=',Ns);
writeln('N=',N);

```

```

assign(fl,'sv_lin.txt');
rewrite(fl);
for i:=1 to Ns do
  begin
    writeln(fl,sv[i,1],' ',sv[i,2]);
  end;
close(fl);
assign(fl,'circul.txt');
rewrite(fl);
for i:=1 to N do
  writeln(fl,circ[i]);
close(fl);
summa:=0;
for i:=1 to N do summa:=summa+circ[i];
writeln('summa=',summa:0:6);
{ x[1]:=-0.08; x[2]:=0.12;
evn[1]:=-1; evn[2]:=0;
skorost(x,evn,skor);
writeln('x=',x[1]:0:5,' ',x[2]:0:5,' ',skor:0:8);
readln;
x[1]:=-0.08; x[2]:=0.12;
evn[1]:=0; evn[2]:=1;
skorost(x,evn,skor);
writeln('x=',x[1]:0:5,' ',x[2]:0:5,' ',skor:0:8);
readln; }
//Построение линии тока
x[1]:=pv[1,1]; x[2]:=pv[1,2];// начальная точка для построения линии тока
psv[0,1]:=x[1]; psv[0,2]:=x[2];
i:=1;
while {chet<=vn}(x[1]>=-kalibr/2{+10*h}{sv[Ns,1]}) ///////////////////////////////////////////////////
do
  begin
    px[1]:=x[1];px[2]:=x[2];
    lynchag(x);
    evn[1]:=0; evn[2]:=1;
    skorost(x,evn,skor);
    evn[1]:=1; evn[2]:=0;
    skorost(x,evn,skorx);
    if (x[1]<0.9*b)and(abs(x[2]-b)<h)then break;
    if x[2]<b then break;
  if (sqrt(sqrt(x[1]-psv[i-1,1])+sqrt(x[2]-psv[i-1,2]))>=h)
  then begin
    psv[i,1]:=x[1]; psv[i,2]:=x[2];
    writeln(i,' ',psv[i,1]:0:5,' ',psv[i,2]:0:5,' ',sqrt(sqrt(x[1]-psv[i-1,1])+sqrt(x[2]-psv[i-1,2])):0:5,' Vx=',skorx:6,' Vy=',skor);
    {if ((psv[i,2]>psv[i-1,2])) and (psv[i,2]<0.9*B)
      {Если ордината точки линии тока больше, чем ордината предыдущей точки
      этой линии, то выход из цикла}
      then
      begin
        i:=i-1;
        break;
      end;}
    i:=i+1;
  end;
end;
{x[2]:=psv[i,2]; //Далее ордината точек линии тока не изменяется
while (x[1]>ud)and(psv[i,1]>ud) do
begin
  i:=i+1;
  psv[i,1]:=psv[i-1,1]-h; psv[i,2]:=x[2];
  writeln(i,' ',psv[i,1]:0:5,' ',psv[i,2]:0:5);

```

```

end;}
Ns_:=i-1;
db:=sv[Ns_-otstup,2];
assign(fl,'lin1_.txt');
rewrite(fl);
for i:=1 to Ns_ do
begin //начало записи
writeln(fl,psv[i,1]:0:5,' ',psv[i,2]:0:5);
end; //конец записи в файл
close(fl);
writeln('Ns_=' ,Ns_);
writeln((db-psv[Ns_-otstup,2]):0:6,' db= ',DB:0:6,' psv=',psv[Ns_-otstup,2]:0:6,' sv=',sv[Ns_-otstup,2]:0:6);
//формируется массив координат свободной линии тока
for i:=1 to Ns_ do
begin
sv[i,1]:=psv[i,1]; sv[i,2]:=psv[i,2];
//writeln(i,' ',sv[i,1]:0:5,' ',sv[i,2]:0:5);
end;
Ns:= Ns_;
writeln('svGSt = ',svGSt:0:10);
writeln('svG = ',svG:0:10);
// циркуляция на 1 свободной линии тока
vn:=vn+1;
writeln('Vn=',vn);
END;
writeln('cikl zakonchen');
end.

```

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ ТОКА И ТРАЕКТОРИЙ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

```

program skorst;
{$mode objfpc}{$H+}
uses
  FileUtil, SysUtils;
const ku=10900; chag=0.000005 ;
type vektor=array[1..2]of real;
      matr=array[1..ku,1..ku]of real;
      mast=array[1..ku,1..2]of real;
      mass=array[1..ku]of real;
      dim=array[1..4]of real;
var x, evn, {единичный вектор направления вдоль которого определяется скорость}
    Tkontr, Tvixr, ptochka, px, V, tp, xmax: vektor;
    d, h, b, kalibr, svG, svGSt, skor, skorx, dlina, max,
    c, M, S, db, al, rast, vsr, t, Ulov, Upala, sred, Sa, Va, Be, de, v0, ud, Vb, Vo, pdy, hsr, summa: real;
    i, j, k, n, Ns, Ns_, p, q, vn, R, l, n2, N3, prop, otstup, kri, chet: integer;
    kt {массив контрольных точек},
    rv {массив координат присоединенных вихрей},
    sv, psv {массив координат вихрей, лежащих на свободной линии тока}: mast;
    kof {массив влияния на контрольные точки вихрей}, fok: matr;
    pr, prom: mass; {массив свободных членов СЛАУ для определения циркуляций присоединенных вихрей}
    circ: mass; {массив циркуляций присоединенных вихрей}
    y, py: dim; {массив координат y[1], y[2] пылевой частицы и составляющих скорости гор. y[3] и верт y[4]}
    fl: text;
    vre: string;
function v2(x, k, n: vektor): real;
// функция влияния на точку x с координатами x[1], x[2]
// единичного кольцевого вихря, расположенного в точке k с координатами k[1], k[2]
// вдоль направления единичного вектора n с координатами n[1], n[2]
function EK(t: real): real;
var p: real;
begin
p:=1.38629436112+0.09666344259*(1-t)+0.03590092383*(1-t)*(1-t)+

```

```

0.03742563713*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.01451196212*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t)+
ln(1/(1-t))*(0.5+0.12498593597*(1-t)+0.06880248576*(1-t)*(1-t)+
0.03328355346*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.00441787012*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t));
EK:=p;
end;
function EE(t:real):real;
  var p:real;
begin
  p:=1+0.44325141463*(1-t)+0.06260601220*(1-t)*(1-t)+
  0.04757383546*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.01736506451*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t)+
  ln(1/(1-t))*(0.24998368310*(1-t)+0.09200180037*(1-t)*(1-t)+
  0.04069697526*(1-t)*(1-t)*(1-t)+0.00526449639*(1-t)*(1-t)*(1-t)*(1-t));
  EE:=p;
end;
var a,b,r,rh,a1,a2,t:real; s:vektor;
// a - дополнительная переменная, r - расстояние между точками
//rh - шаг дискретности
begin
  //x[1]:=1; x[2]:=2;
  //k[1]:=10; k[2]:=2.4;
  //n[1]:=1; n[2]:=0;
  b:=2*k[2]*x[2];
  a:=
  sqr(x[1]-k[1])+sqr(k[2])+sqr(x[2]);
  A1:=k[2]*k[2]*n[1]/4/pi;
  A2:=k[2]*((x[1]-k[1])*n[2]-x[2]*n[1])/4/pi;
  r:=
  sqr(x[1]-k[1])+sqr(k[2])+sqr(x[2]);
  //writeln('r=',r:0:6);
  //readln;
  rh:=0.5*h;
  if r<rh then {Если расстояние до вихря меньше шага дискретности}
  begin
    //v2:=0
    if r<0.000001 then v2:=0//v2:=1/4/pi*n[1]*(ln(8*k[2]/rh)-1/4)
    else
    begin
      s[1]:=rh/r*(x[1]-k[1])+k[1];
      s[2]:=rh/r*(x[2]-k[2])+k[2];
      a:=((s[1]-k[1])*n[2]-(s[2]-k[2])*n[1])/2/pi;
      //v2:=r/rh*a/(sqr(k[1]-s[1])+sqr(k[2]-s[2]));
      v2:=((x[1]-k[1])*n[2]-(x[2]-k[2])*n[1])/2/pi/rh/rh;
    end;
  end
  else
  if abs(b)>0.0000001
  then
  begin
    t:=2*b/(a+b);
    // v2:=-n[1]/4/pi/sqrt(sqr(x[1]-k[1])+sqr(x[2]+k[2]))*
    // ((2-t)/(1-t)*EE(t)-2*EK(t)-k[2]/x[2]*t/(1-t)*EE(t)+
    // n[2]/4/pi*(x[1]-k[1])/x[2]/sqrt(sqr(x[1]-k[1])+sqr(x[2]+k[2]))*
    // ((2-t)/(1-t)*EE(t)-2*EK(t));
    // writeln(test);
    v2:=(A1*b+A2*a)*4/b/(a-b)/sqrt(a+b)*EE(t)-A2*4*EK(t)/b/sqrt(a+b);
    //writeln(test);
    //readln;
  end
  else
  v2:=k[2]*k[2]*n[1]/2/a/sqrt(a);
end;
end;

```

```

procedure skorost(Tkontr, evn:vektor; var skor:real);
//Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой вихрей
var Tvixr:vektor; q:integer;
begin
skor:=0;
//Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой присоединенных вихрей
for q:=1 to N do
begin
Tvixr[1]:=pv[q,1]; Tvixr[2]:=pv[q,2];
skor:=skor+circ[q]*v2(Tkontr,Tvixr,evn);
//writeln('skor=',skor:0:8);
//writeln(Tvixr[1]:0:8,' ',Tvixr[2]:0:8);
//writeln(Tkontr[1]:0:8,' ',Tkontr[2]:0:8);
//writeln(evn[1]:0:5,' ',evn[2]:0:8);
//writeln(circ[q]:0:8);
//readln;
end;
//writeln('skor=',skor:0:8);
//Вычисление скорости в точке Tkontr, вызываемой системой свободных вихрей
for q:=1 to Ns do
begin
Tvixr[1]:=sv[q,1]; Tvixr[2]:=sv[q,2];
skor:=skor+svG*v2(Tkontr,Tvixr,evn);
end;
//writeln('skor=',skor:0:8);
skor:=skor+evn[1]*Vb;
//writeln('skor=',skor:0:8);
end;
{Шаг по линии тока против направления вектора скорости}
procedure linchag2(var x:vektor);
const ch=0.00001;
var y, evn, ev:vektor; skr:real;
begin
evn[1]:=1; evn[2]:=0;
y:=x;
skorost(x, evn, skr);
x[1]:=x[1]-skr*ch;
evn[1]:=0; evn[2]:=1;
skorost(y, evn, skr);
x[2]:=x[2]-skr*ch;
end;
procedure linchag(var x:vektor);
var evn:vektor;
begin
evn[1]:=1; evn[2]:=0;
skorost(x, evn, skorx);
evn[1]:=0; evn[2]:=1;
skorost(x, evn, skor);
x[1]:=x[1]+chag*skorx/sqrt(sqrt(skorx)+sqrt(skor));
x[2]:=x[2]+chag*skor/sqrt(sqrt(skorx)+sqrt(skor));
end;
procedure sodu(v:vektor; var x:real; var y:dim);
const n=4;
type dim1=array[1..4]of real;
var w,k1,k2,k3,k4:dim1; con,h:real; j:integer;
function fun(v:vektor; j:integer; x:real; y:dim):real;
const
g=9.81;
ro=2500; {плотность частицы} kf=1; {коэффициент формы}
vjaz=1.5/100000; {кинематическая вязкость воздуха} gov=1.2; {плотность воздуха }
var A,B,Re:real;

```

```

begin
A:=pi*de*de*de/6*ro;
Re:=de*rov*sqrt(sqrt(y[3]-v[1])+sqrt(y[4]-v[2]))/vjaz;
//if kri=0 then begin writeln('Re=',Re:0:8); readln; kri:=2 end;
if Re<1 then begin B:=3*pi*kf*vjaz*de*rov; { writeln('Re=',Re:0:8,' ',y[1]:0:8,' ',y[2]:0:8); } end;
if (Re>=1) and (Re<1000) then begin B:=3*pi*kf*vjaz*de*rov*(1+1/6*exp(2/3*ln(Re))); { writeln('Re=',Re:0:8); } end;
if (Re>=1000) then B:=3*pi*kf*vjaz*de*rov*(1+0.065*exp(2/3*ln(Re)))*sqrt((1+0.065*exp(2/3*ln(Re))));
if j=1 then fun:=y[3]; if j=3 then fun:=g-B/A*(y[3]-v[1]);
//сила тяжести направлена вправо вдоль положительного направления OX
if j=2 then fun:=y[4]; if j=4 then fun:=-B/A*(y[4]-v[2])
end;
begin
h:=0.00005; { шаг интегрирования }
for j:=1 to n do w[j]:=y[j]; for j:=1 to n do k1[j]:=h*fun(v,j,x,y);
for j:=1 to n do y[j]:=w[j]+1/2*k1[j]; for j:=1 to n do k2[j]:=h*fun(v,j,x+1/2*h,y);
for j:=1 to n do y[j]:=w[j]+1/2*k2[j]; for j:=1 to n do k3[j]:=h*fun(v,j,x+1/2*h,y);
for j:=1 to n do y[j]:=w[j]+k3[j]; for j:=1 to n do k4[j]:=h*fun(v,j,x+h,y);
for j:=1 to n do y[j]:=w[j]+(k1[j]+2*k2[j]+2*k3[j]+k4[j])/6;
x:=x+h; //шаг по времени
end;
begin
vre:=TimeToStr(Now); kri:=0;
//Формирование координат контрольных точек
b:=0.1; { радиус всасывающего отверстия }
d:=1*b; { длина раструба }
h:=0.000625; { шаг дискретности }
Vb:=-3.0; // Скорость набегающего потока
Vo:=1; // Скорость всасывания
kalibr:=10*b; //длина вертикальной и горизонтальной стенки
{Дискретизация раструба}
al:=0*pi/180; { угол наклона раструба к положительному направлению оси OX }
ud:=d*cos(al)+6*B; // удаление плоскости от входа в раструб
otstup:=60;
ptochka[1]:=(d)*cos(al);
ptochka[2]:=B+(d)*sin(al);
k:=1;
i:=1;
repeat
kt[i,1]:=ptochka[1]-h/2*cos(al)-h*(k-1)*cos(al);
kt[i,2]:=ptochka[2]-h/2*sin(al)-h*(k-1)*sin(al);
pv[i,1]:=ptochka[1]-h*cos(al)*(k-1);
pv[i,2]:=ptochka[2]-h*sin(al)*(k-1);
writeln(i,',kt[i,1]:0:5,',kt[i,2]:0:5,',pv[i,1]:0:5,',pv[i,2]:0:5);
//writeln(abs(sqrt(sqrt(pv[i,1]-kt[i,1])+sqrt(pv[i,2]-kt[i,2]))):0:5);
//readln;
i:=i+1;
k:=k+1;
until abs(sqrt(sqrt(pv[i-1,1]-ptochka[1])+sqrt(pv[i-1,2]-ptochka[2]))-(kalibr))<0.0001;
// until abs(sqrt(sqrt(kt[i-1,1]-ptochka[1])+sqrt(kt[i-1,2]-ptochka[2]))-(kalibr))<0.0001;
N2:=i-1;
//дискретизация всасывающего проема
ud:=-kalibr/2;
kt[i,1]:=ud; kt[i,2]:=b-h/2;
while kt[i,2]>0.0 do
begin
pv[i,1]:=ud;
pv[i,2]:=kt[i,2]-h/2;
writeln(i,',kt[i,1]:0:5,',kt[i,2]:0:5,',pv[i,1]:0:5,',pv[i,2]:0:5);
i:=i+1;
kt[i,1]:=ud;
kt[i,2]:=pv[i-1,2]-h/2;

```

```

    //readln;
    end;
    N:=i-1; //количество контрольных точек
    //pv[N+1,2]:=0.000; pv[N+1,1]:=ud;
    pv[N,1]:=kt[N2,1]-h/2;  pv[N,2]:=kt[N2,2];
    writeln('N=',N,' N2=',N2,' ,kt[N,1]:0:5,' , kt[N,2]:0:5,' ,pv[N,1]:0:5,' , pv[N,2]:0:5);
    // readln;
assign(fl,'circul.txt');
reset(fl);
i:=1;
while not eof(fl) do
    begin
        readln(fl,circ[i]);
        //writeln(i,' ',circ[i]);
        i:=i+1;
        //readln;
    end;
close(fl);
svG:=circ[1];
assign(fl,'sv_lin.txt');
reset(fl);
i:=1;
while not eof(fl) do
    begin
readln(fl,sv[i,1],sv[i,2]);
//writeln(i,' ',sv[i,1],' ',sv[i,2]);
i:=i+1;
end;
close(fl);
Ns:=i-1;
writeln(svG);
writeln('Ns=',Ns);
writeln('N=',N);
writeln('N2=',N2);
for i:=1 to N do begin
if (i>=1)and(i<=N2) then begin evn[1]:=0; evn[2]:=1; end else begin evn[1]:=-1; evn[2]:=0; end ;
x[1]:=kt[i,1]; x[2]:=kt[i,2];
skorost(x,evn,skor);
writeln('x=',x[1]:0:5,' ',x[2]:0:5,' ',skor:0:8);
//readln;
end;
x[1]:=2; x[2]:=0.2;
while x[1]>-1 do begin
evn[1]:=1; evn[2]:=0;
skorost(x,evn,skor);
writeln('x=',x[1]:0:5,' ',x[2]:0:5,' ',skor:0:8);
x[1]:=x[1]-0.01;
readln;
end;
prop:=100;
{ Построение линии тока }
assign(fl,'lin1.txt');  rewrite(fl);
i:=1;
x[1]:=-0.2; x[2]:=0.01; // начальная точка для построения линии тока
while (x[1]<=-2*B) do
begin
    if (i=1)or(i mod prop = 0) then writeln(fl,x[1]:0:5,' ',x[2]:0:5);
    linchag2(x);
    i:=i+1;
end;
close(fl);

```

```

{Вычисление радиуса эффективного всасывания}
x[1]:=d*cos(al); x[2]:=B+d*sin(al);
while (x[1]>=d*cos(al))do
begin
linchag(x); //writeln(x[1]:0:6, ' ',x[2]:0:6);
end;

Be:=x[2];
writeln('Be=',Be:0:6,' tp= ',tp[1]:0:6,' ',tp[2]:0:6,' a-ao= ',
abs(cos(al)*(tp[1]-d*cos(al))+sin(al)*(tp[2]-B-d*sin(al))):0:6
{sqrt(sqrt(tp[1]-d*cos(al))+sqrt(tp[2]-B-d*sin(al))-sqrt(tp[1]*sin(al)-tp[2]*cos(al)+B*cos(al))):0:6});
//readln;

{Вычисление максимального отхода свободной линии тока от раструба}
x[1]:=d*cos(al); x[2]:=B+d*sin(al);
max:=abs(x[1]*sin(al)-x[2]*cos(al)+B*cos(al));
while (x[1]>=0)do
begin
linchag(x);
if abs(x[1]*sin(al)-x[2]*cos(al)+B*cos(al))>max then
begin
max:=abs(x[1]*sin(al)-x[2]*cos(al)+B*cos(al));
xmax[1]:=x[1]; xmax[2]:=x[2]
end;
end;
writeln('b=',max:0:6,' x[1]=' ,xmax[1]:0:6,' x[2]=' ,xmax[2]:0:6);
writeln('l=',sqrt(sqrt(xmax[1]-d*cos(al))+sqrt(xmax[2]-d*sin(al)-B)-max*max):0:6);

{Вычисление максимального выхода свободной линии тока за раструба}
x[1]:=d*cos(al); x[2]:=B+d*sin(al); linchag(x);
max:=abs(x[1]*cos(al)+x[2]*sin(al)-d-B*sin(al));
while (x[1]*cos(al)+x[2]*sin(al)-d-B*sin(al))>0 do
begin
linchag(x);
if abs(x[1]*cos(al)+x[2]*sin(al)-d-B*sin(al))>max then
begin
max:=abs(x[1]*cos(al)+x[2]*sin(al)-d-B*sin(al));
xmax[1]:=x[1]; xmax[2]:=x[2]
end;
end;
writeln('ao=',max:0:6,' x[1]=' ,xmax[1]:0:6,' x[2]=' ,xmax[2]:0:6);

{Вычисление длины вихревой зоны a}
x[1]:=d*cos(al); x[2]:=B+d*sin(al);
while x[1]>0 do
begin
linchag(x);
rast:=abs(x[1]*sin(al)-x[2]*cos(al)+B*cos(al));
if ((abs(rast)<h)and(x[2]<B+d)and (abs(al-pi/2)<0.000001)) then break;
if ((abs(rast)<h)and(x[1]<d*cos(al))and (abs(al-pi/2)>0.000001)) then break;
//writeln(rast:0:6);
end;
tp[1]:=x[1]; tp[2]:=x[2];
//writeln(rast:0:6);
writeln(abs(cos(al)*(x[1]-d*cos(al))+sin(al)*(x[2]-B-d*sin(al))):0:6,' tp1=',tp[1]:0:6,' tp2=',tp[2]:0:6);
{assign(fl,'lin1_.txt');
reset(fl);
while x[1]>0 do
begin

```

```

tp[1]:=x[1]; tp[2]:=x[2];
readln(x[1],x[2]);
end;
close(fl);
writeln(rast:0:6);
writeln(abs(cos(al)*(tp[1]-d*cos(al))+sin(al)*(tp[2]-B-d*sin(al))):0:6,' tp1=',tp[1]:0:6,' tp2=',tp[2]:0:6); }
assign(fl,'skorsr.txt');
rewrite(fl);
readln;
{Построение линии тока}
  //ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ
    t:=0; //начальный момент времени
    de:=40/1000000;
    y[1]:=0*B; y[2]:=B; // начальные координаты
    y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы

    i:=0;
    Ulov:=B;//в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица улавливается
    Upala:=40*B; //в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица падает
    sred:=(Ulov+Upala)/2; //делим расстояние между этими ординатами пополам
    y[2]:=sred;
    while abs(Ulov-Upala)>0.00000001 do //цикл нахождения предельной траектории пылевой частицы
    begin
    assign(fl,'traector40.txt'); rewrite(fl);
    t:=0; //начальный момент време
      while (y[1]>-B)and(y[1]<15*B){and(y[2]>=B)}{and(y[1]<ud-10*h)} do
      begin
      //writeln(fl,y[1]:0:3,' ',y[2]:0:3,' ',y[3]:0:3,' ',y[4]:0:3);
      x[1]:=y[1]; x[2]:=y[2]; // в этой точке будет вычисляться скорость воздуха
      evn[1]:=1; evn[2]:=0; skorost(x,evn,skorx);V[1]:=skorx; // вычисляется горизонтальная составляющая скорости
воздуха
      evn[1]:=0; evn[2]:=1; skorost(x,evn,skor); V[2]:=skor; // вычисляется вертикальная составляющая скорости
воздуха
      pdy:=y[2];
      sodu(V,t,y); //вычисляются новое положение частицы и составляющие скорости
      // if (y[1]<d-2*h)and(y[2]<B+h/2)and(pdy>=B+h/2) then begin y[2]:=B+h/2; writeln(y[2]:0:10); break end;
      // if (y[1]<d)and(y[2]<B)and(pdy>=B) then begin y[2]:=B; writeln(y[2]:0:10); break end;
      if (i mod 50 = 0)or(i=0) then writeln(fl,y[1]:0:8,' ',y[2]:0:8);
      i:=i+1;
      end;
    if (y[2]<B)and(y[1]<d) then Ulov:=sred else Upala:=sred;
    writeln('x=',y[1]:0:3,' y=',y[2]:0:3,' Vx=',V[1]:0:6,' Ulov=',Ulov:0:8,' Upala=',Upala:0:8,' sred=',sred:0:6);
    sred:=(Ulov+Upala)/2;
    y[1]:=0*B; y[2]:=sred; // начальные координаты
    y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы
    close(fl);
    //readln;
    i:=0;
    end;
  t:=0; //начальный момент времени
  de:=60/1000000;
  y[1]:=0*B; y[2]:=B; // начальные координаты
  y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы
  i:=0;
  Ulov:=B;//в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица улавливается
  Upala:=40*B; //в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица падает
  sred:=(Ulov+Upala)/2; //делим расстояние между этими ординатами пополам
  y[2]:=sred;
  while abs(Ulov-Upala)>0.00000001 do //цикл нахождения предельной траектории пылевой частицы
  begin
  assign(fl,'traector60.txt'); rewrite(fl);

```

```

t:=0; //начальный момент време
while (y[1]>-B)and(y[1]<5*B){and(y[2]>=B)}{and(y[1]<ud-10*h)} do
begin
//writeln(fl,y[1]:0:3,' ',y[2]:0:3,' ',y[3]:0:3,' ',y[4]:0:3);
x[1]:=y[1]; x[2]:=y[2]; // в этой точке будет вычисляться скорость воздуха
evn[1]:=1; evn[2]:=0; skorost(x,evn,skorx);V[1]:=skorx; // вычисляется горизонтальная составляющая скорости
воздуха
evn[1]:=0; evn[2]:=1; skorost(x,evn,skor); V[2]:=skor; // вычисляется вертикальная составляющая скорости
воздуха
pdy:=y[2];
sodu(V,t,y); //вычисляются новое положение частицы и составляющие скорости
if (i mod 50 = 0)or(i=0) then writeln(fl,y[1]:0:8,' ',y[2]:0:8);
i:=i+1;
end;
if (y[2]<B)and(y[1]<d) then Ulov:=sred else Upala:=sred;
writeln('x=',y[1]:0:3,' y=',y[2]:0:3,' Vx=',V[1]:0:6,' Ulov=',Ulov:0:8,' Upala=',Upala:0:8,' sred=',sred:0:6);
sred:=(Ulov+Upala)/2;
y[1]:=0*B; y[2]:=sred; // начальные координаты
y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы
close(fl);
//readln;
i:=0;
end;
writeln('postroeno');
t:=0; //начальный момент времени
de:=80/1000000;
y[1]:=0*B; y[2]:=B; // начальные координаты
y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы

i:=0;
Ulov:=B;//в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица улавливается
Upala:=40*B; //в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица падает
sred:=(Ulov+Upala)/2; //делим расстояние между этими ординатами пополам
y[2]:=sred;
while abs(Ulov-Upala)>0.00000001 do //цикл нахождения предельной траектории пылевой частицы
begin
assign(fl,'traector80.txt'); rewrite(fl);
t:=0; //начальный момент време
while (y[1]>-B)and(y[1]<5*B){and(y[2]>=B)}{and(y[1]<ud-10*h)} do
begin
//writeln(fl,y[1]:0:3,' ',y[2]:0:3,' ',y[3]:0:3,' ',y[4]:0:3);
x[1]:=y[1]; x[2]:=y[2]; // в этой точке будет вычисляться скорость воздуха
evn[1]:=1; evn[2]:=0; skorost(x,evn,skorx);V[1]:=skorx; // вычисляется горизонтальная составляющая скорости
воздуха
evn[1]:=0; evn[2]:=1; skorost(x,evn,skor); V[2]:=skor; // вычисляется вертикальная составляющая скорости
воздуха
pdy:=y[2];
sodu(V,t,y); //вычисляются новое положение частицы и составляющие скорости
if (i mod 50 = 0)or(i=0) then writeln(fl,y[1]:0:8,' ',y[2]:0:8);
i:=i+1;
end;
if (y[2]<B)and(y[1]<d) then Ulov:=sred else Upala:=sred;
writeln('x=',y[1]:0:3,' y=',y[2]:0:3,' Vx=',V[1]:0:6,' Ulov=',Ulov:0:8,' Upala=',Upala:0:8,' sred=',sred:0:6);
sred:=(Ulov+Upala)/2;
y[1]:=0*B; y[2]:=sred; // начальные координаты
y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы
close(fl);
//readln;
i:=0;
end;
writeln('postroeno');

```

```

t:=0; //начальный момент времени
de:=20/1000000;
y[1]:=10*B; y[2]:=B; // начальные координаты
y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы

i:=0;
Ulov:=B;//в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица улавливается
Upala:=40*B; //в этой переменной должна быть помещена ордината, при которой частица падает
sred:=(Ulov+Upala)/2; //делим расстояние между этими ординатами пополам
y[2]:=sred;
while abs(Ulov-Upala)>0.00000001 do //цикл нахождения предельной траектории пылевой частицы
begin
assign(fl,'traector20.txt'); rewrite(fl);
t:=0; //начальный момент време
while (y[1]>-0.5){and(y[2]>=B)}{and(y[1]<ud-10*h)} do
begin
//writeln(fl,y[1]:0:3,' ',y[2]:0:3,' ',y[3]:0:3,' ',y[4]:0:3);
x[1]:=y[1]; x[2]:=y[2]; // в этой точке будет вычисляться скорость воздуха
evn[1]:=1; evn[2]:=0; skorost(x,evn,skorx);V[1]:=skorx; // вычисляется горизонтальная составляющая скорости
воздуха
evn[1]:=0; evn[2]:=1; skorost(x,evn,skor); V[2]:=skor; // вычисляется вертикальная составляющая скорости
воздуха
pdy:=y[2];
sodu(V,t,y); //вычисляются новое положение частицы и составляющие скорости
//if (y[1]<d-2*h)and(y[2]<B+h/2)and(pdy>=B+h/2) then begin y[2]:=B+h/2; writeln(y[2]:0:10); break end;
if (y[1]<d)and(y[2]<B)and(pdy>=B) then begin y[2]:=B; writeln(y[2]:0:10); break end;
if (i mod 50 = 0)or(i=0) then writeln(fl,y[1]:0:8,' ',y[2]:0:8);
i:=i+1;
end;
if (y[2]<B)and(y[1]<d) then Ulov:=sred else Upala:=sred;
writeln('x=',y[1]:0:3,' y=',y[2]:0:3,' Vx=',V[1]:0:6,' Ulov=',Ulov:0:8,' Upala=',Upala:0:8,' sred=',sred:0:6);
sred:=(Ulov+Upala)/2;
y[1]:=10*B; y[2]:=sred; // начальные координаты
y[3]:=0; y[4]:=0; // начальные скорости пылевой частицы
close(fl);
//readln;
i:=0;
end;
writeln('postroeno');
readln;
end.

```

Приложение Б – Листинг программы для ЭВМ расчёта течения вблизи приточно-вытяжного устройства

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs,
  GLScene, GLCoordinates, GLObjects, GLWin32Viewer, GLCrossPlatform,
  BaseClasses, GLGeomObjects,
  GLColor, GLGui, GLWindows, GLExtrusion, ExtCtrls, StdCtrls,
  Tests, MathUtils, Unit2, Buttons, GLHUDObjects, GLGraph, GLBitmapFont, Menus,
  GLSpaceText, Math;
type
TForm1 = class(TForm)
  GLSceneViewer1: TGLSceneViewer;
  GLScene1: TGLScene;
  GLCamera1: TGLCamera;
  GLBaseControl1: TGLBaseControl;
  GLDummyCube1: TGLDummyCube;
  GLPipe1: TGLPipe;
  DiscreteRoot: TGLBaseControl;
  GLLightSource1: TGLLightSource;
  CheckBox1: TCheckBox;
  Bevel1: TBevel;
  GroupBox1: TGroupBox;
  btnCountSpeed: TButton;
  edSpeedX: TEdit;
  edSpeedY: TEdit;
  Label1: TLabel;
  edSpeedZ:
    TEdit;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  Label4: TLabel;
  btnViewLeft: TSpeedButton;
  btnViewRight: TSpeedButton;
  Label5: TLabel;
  SpeedButton3: TSpeedButton;
  SpeedButton4: TSpeedButton;
  GroupBox2: TGroupBox;
  Label6: TLabel;
  Label7: TLabel;
  Label8: TLabel;
  Label9: TLabel;
  btnFlowLine: TButton;
  edFlowLineX: TEdit;
  edFlowLineY: TEdit;
  edFlowLineZ: TEdit;
  edFlowLineLength: TEdit;

```

```

Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
edFlowLineStep: TEdit;
GroupBox3: TGroupBox;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
edTubeLength: TEdit;
edTubeRadius: TEdit;
edSpeed: TEdit;
edCircleCount: TEdit;
edCircleRibsCount: TEdit;
btnSaveParams: TButton;
btnViewUp: TSpeedButton;
SpeedButton1: TSpeedButton;
Label17: TLabel;
FreeVortexesRoot: TGLBaseControl;
TestRoot: TGLBaseControl;
GroupBox4: TGroupBox;
Label20: TLabel;
edStep: TEdit;
btnStart: TButton;
btnStop: TButton;
btnStep: TButton;
lbModelStep: TLabel;
lbModelTime: TLabel;
lbH: TLabel;
cbShowTube: TCheckBox;
AxesRoot: TGLBaseControl;
AxesDummyCube: TGLDummyCube;
GLBitmapFont1: TGLBitmapFont;
MainMenu1: TMainMenu;
N1: TMenuItem;  miExit: TMenuItem;
N2: TMenuItem;  miInflowPoints: TMenuItem;
N3: TMenuItem;  Button1: TButton;
cbShowFreeFrames: TCheckBox;
Label18: TLabel;
edH: TEdit;
imChooseDiscrStep: TMenuItem;
btnFlowLineCoords: TButton;
Label19: TLabel;
edTubeRadiusOuter: TEdit;
cbHasInflow: TCheckBox;
edInflowR1: TEdit;  edInflowR2: TEdit;
Label22: TLabel;  Label21: TLabel;  Label23: TLabel;
edInflowSpeed: TEdit;
GLDiskOutside: TGLDisk;  GLDiskInside: TGLDisk;  GLPipeOuter: TGLPipe;
GLDiskInflow: TGLDisk;
N4: TMenuItem;
cbShowFlowLines: TCheckBox;
Label25: TLabel;
FlowLinesRoot: TGLBaseControl;
btnDeleteFlowLines: TButton;
miAvgSpeed: TMenuItem;
N5: TMenuItem;
miAvgSpeedResults: TMenuItem;
btnContinue: TButton;

```

```

procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure GLSceneViewer1MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure GLSceneViewer1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
procedure GLSceneViewer1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure CheckBox1Click(Sender: TObject); procedure btnCountSpeedClick(Sender: TObject);
procedure btnInflowPointsInfoClick(Sender: TObject);
procedure btnViewLeftClick(Sender: TObject); procedure btnViewRightClick(Sender: TObject);
procedure SpeedButton3Click(Sender: TObject); procedure SpeedButton4Click(Sender: TObject);
procedure btnFlowLineClick(Sender: TObject); procedure btnSaveParamsClick(Sender: TObject);
procedure btnViewUpClick(Sender: TObject); procedure SpeedButton1Click(Sender: TObject);
procedure btnStartClick(Sender: TObject); procedure btnStopClick(Sender: TObject);
procedure btnStepClick(Sender: TObject); procedure cbShowTubeClick(Sender: TObject);
procedure miExitClick(Sender: TObject); procedure N3Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject); procedure cbShowFreeFramesClick(Sender: TObject);
procedure imChooseDiscrStepClick(Sender: TObject); procedure btnFlowLineCoordsClick(Sender: TObject);
procedure cbHasInflowClick(Sender: TObject); procedure N4Click(Sender: TObject);
procedure btnContinueClick(Sender: TObject); procedure cbShowFlowLinesClick(Sender: TObject);
procedure btnDeleteFlowLinesClick(Sender: TObject); procedure miAvgSpeedClick(Sender: TObject);
procedure miAvgSpeedResultsClick(Sender: TObject);
private
  RotateFlag: Boolean;
  RotatePrevX, RotatePrevY: Integer;
  StopFlag: Boolean;
// showCountSpeedMsg: Boolean;
  procedure InitVortexes1;
  procedure InitVortexes;
  procedure BuildSystem1;
  procedure BuildSystem;
  procedure UpdateSystem1;
  procedure UpdateSystem;
  procedure SolveSystem;
  procedure MoveVortexFrames;
  procedure MoveVortexFramesOld;
  procedure DumpVortexFrames;
  procedure CalculateAvgSpeed;
  procedure CountCalcFrameArea(var CalcFrame: TCalcFrame);
  function CountSpeed(p: T3dPoint): T3dVector;
  procedure DrawFlowLine(p: T3dPoint; Length, Step: Extended);
  procedure VizualizeVortexFrame(f: TVortexFrame; glContainer: TGLBaseControl; color: TColorVector);
  function IsPointInsideTube(p: T3dPoint): Boolean;
public
  { Public declarations }
end;
// Параметры области
var
  TubeLength: Extended = 1.0; // Длина трубы в метрах
  TubeRadius: Extended = 0.2; // Внутренний радиус трубы в метрах
  TubeRadiusOuter: Extended = 0.5; // Внешний радиус трубы в метрах
  CircleCount: Integer = 12; // Кол-во круговых многоугольных рамок
  CircleNumPoints: Integer = 16; // Кол-во точек на каждой круговой рамке внутренней трубы
  // (должно быть кратно 2)
  Speed: Extended = -1.0; // Скорость воздуха в отверстии в трубе
  HasInflowRing: Boolean = True; // Есть ли приточное кольцо
  InflowRadiusInner: Extended = 0.32; // Внутренний радиус кольца в метрах
  InflowRadiusOuter: Extended = 0.38; // Внешний радиус кольца в метрах
  InflowSpeed: Extended = 0.5; // Скорость воздуха в приточном кольце
  CalcAvgSpeed: Boolean = False; // Рассчитывать или нет среднюю скорость в точках
  AvgSpeedPoints: T3dPointArray; // Точки, в которых рассчитывается сред. скорость

```

```

AvgSpeeds: T3dVectorArray;
AvgSpeedStep: Integer = 0;
var
  DebugMode: Boolean = False;
  CorrectSymmetry: Boolean = True; // Корректировать или нет симметрию вихревых колец
  SymmetryAccuracy: Extended = 0.0005;
var
  VortexFrames: TVortexFrameArray;
  FreeVortexFrames: TVortexFrameArray;
  CalcPoints: TCalcPointArray;
  CalcFrames: TCalcFrameArray;
  Matr: TFloatMatr;
  Gamma: TFloatArray;
  BreakVortexRibs: TBreakVortexRibArray;
  DiscrStep: Extended = 0.02; // Шаг дискретности
  DiscrStepSpeed: Extended = 0.02; // Шаг дискретности при расчете скорости
  DiscrStepTube: Extended = 0.02001; // "Шаг дискретности" при движении точек вблизи трубы
  ModelStep: Integer = 0;
  ModelTime: Extended = 0.0;
  MinCalcPointRibDistance: Extended;
  OutCircleNumPoints: Integer; // Кол-во точек (или ребер) на любом кольце внешней трубы
  TubeCalcPointCount: Integer; // Кол-во расч. точек на твердых стенках трубы
  InflowCalcPointMin, InflowCalcPointMax: Integer;
var
  BreakPoints: array of record
    VortexIndex: Integer;
    atInnerTube: Boolean;
  end;
var
  Form1: TForm1;
implementation
uses uFlatProjection, uDiscrStepInfo, uFlowLineCoords, uFreeVortexes, uAvgSpeed,
  uAvgSpeedResults;
{$R *.dfm}
function TForm1.CountSpeed(p: T3dPoint): T3dVector;
var
  i, k: Integer;
  v: T3dVector;
  SkipFlag: Boolean;
// str: string;
begin
  SetVector(Result, 0, 0, 0);
  for k := 0 to High(VortexFrames) do
  begin
    SkipFlag := False;
    for i := 0 to High(VortexFrames[k].Ribs) do
    begin
      if PointsDistance(p, VortexFrames[k].Ribs[i].a) < DiscrStepSpeed {50} then
      begin
        SkipFlag := True;
        break;
      end;
    end;
  end;
  if SkipFlag then
    continue;
  SetVector(v, 0, 0, 0);
  for i := 0 to High(VortexFrames[k].Ribs) do
  begin
//    if (PointsDistance(p, VortexFrames[k].Ribs[i].a) > DiscrStepSpeed) and
//      (PointsDistance(p, VortexFrames[k].Ribs[i].b) > DiscrStepSpeed)

```

```

// then
  v := VectorsAdd(v,funcG(VortexFrames[k].Ribs[i].a,VortexFrames[k].Ribs[i].b,p))
// else str := str + 'fx[' + IntToStr(k) + ',' + IntToStr(i) + ' ]';
end;
Result := VectorsAdd(Result,ScaleVector(v,Gamma[k]));
end;
for k := 0 to High(FreeVortexFrames) do
begin
{}
  SkipFlag := False;
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames[k].Ribs) do
  begin
    if PointsDistance(p,FreeVortexFrames[k].Ribs[i].a)<DiscrStepSpeed{50} then
    begin
      SkipFlag := True;
      break;
    end;
  end;
  if SkipFlag then
    continue;
{}
  SetVector(v, 0, 0, 0);
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames[k].Ribs) do
  begin
//   if (PointsDistance(p,FreeVortexFrames[k].Ribs[i].a)>DiscrStepSpeed) and
//     (PointsDistance(p,FreeVortexFrames[k].Ribs[i].b)>DiscrStepSpeed)
//   then
    v := VectorsAdd(v,funcG(FreeVortexFrames[k].Ribs[i].a,FreeVortexFrames[k].Ribs[i].b,p))
//   else str := str + 'fr[' + IntToStr(k) + ',' + IntToStr(i) + ' ]';
  end;
  Result := VectorsAdd(Result,ScaleVector(v,FreeVortexFrames[k].Gamma));
end;
// if showCountSpeedMsg then
//   ShowMessage(str);
//end;
procedure TForm1.DrawFlowLine(p: T3dPoint; Length: Extended; Step: Extended);
var
  curLen: Extended;
  v: T3dVector;
  lns: TGLLines;
  pp: T3dPoint;
  ppInside, pInside: Boolean;
begin
  lns := TGLLines.Create(Self);
  lns.NodesAspect := lnaInvisible;
  lns.LineColor.Initialize(clrForestGreen);
  lns.LineWidth := 2;
  lns.AddNode(p.x, p.y, p.z);
  curLen := 0;
  fFlowLineCoords.mmFlowLineCoords.Lines.Clear;
  fFlowLineCoords.mmFlowLineCoords.Lines.Add(
    FloatToStrF(p.x,ffFixed,10,6) + chr(9) +
    FloatToStrF(p.y,ffFixed,10,6) + chr(9) +
    FloatToStrF(p.z,ffFixed,10,6)
  );
  while curLen < Length do
  begin
    v := CountSpeed(p);
    v := ScaleVector(v, Step/VectorModulus(v));
    pp := p;
    p.x := p.x + v.x;

```

```

p.y := p.y + v.y;
p.z := p.z + v.z;
ppInside := IsPointInsideTube(pp);
pInside := IsPointInsideTube(p);
if (ppInside and (p.x<0)) then Break;
if (ppInside <> pInside) then
begin
  if (Abs(p.x)<TubeLength/2) and (Abs(pp.x)<TubeLength/2) then
    Break;
end;
Ins.AddNode(p.x, p.y, p.z);
fFlowLineCoords.mmFlowLineCoords.Lines.Add(
  FloatToStrF(p.x,ffFixed,10,6) + chr(9) +
  FloatToStrF(p.y,ffFixed,10,6) + chr(9) +
  FloatToStrF(p.z,ffFixed,10,6)
);
curLen := curLen + Step;
end;
FlowLinesRoot.AddChild(Ins);
end;
procedure TForm1.DumpVortexFrames;
var F: TextFile;
    i: Integer;
begin
  AssignFile(F,'vortex_frames.txt');
  Append(F);
  writeln(F,'Step ' + IntToStr(ModelStep));
  writeln(F,'-----');
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
  begin
    writeln(F,IntToStr(i):3,' ',
      '(' ,FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.x:7:4,',',FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.y:7:4,',',FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.z:7:4,')
    - ',
      '(' ,FreeVortexFrames[i].Ribs[0].b.x:7:4,',',FreeVortexFrames[i].Ribs[0].b.y:7:4,',',FreeVortexFrames[i].Ribs[0].b.z:7:4,')
    ');
  end;
  writeln(F);
  CloseFile(F);
end;
procedure TForm1.CountCalcFrameArea(var CalcFrame: TCalcFrame);
var
  Points: T2dPointArray;
  i: Integer;
begin
  SetLength(Points,High(CalcFrame.Ribs)+1);
  for i := 0 to High(CalcFrame.Ribs) do
  begin
    Points[i].x := CalcFrame.Ribs[i].a.z;
    Points[i].y := CalcFrame.Ribs[i].a.y;
  end;
  CalcFrame.s := ConvexPoligonArea(Points);
end;
procedure TForm1.InitVortexes;
var
  i, j: Integer;
  lns: TGLLines;
  sph: TGLSphere;
  m: Extended;
  color: TColorVector;
begin
  SetLength(FreeVortexFrames,0);

```

```

InitVortexes1;
// DiscrStep := VectorModulus(RibToVector(VortexFrames[0].Ribs[0]));
// for i := 0 to High(VortexFrames) do
// begin
//   for j := 0 to High(VortexFrames[i].Ribs) do
//     begin
//       m := VectorModulus(RibToVector(VortexFrames[i].Ribs[j]));
//       if m < DiscrStep then
//         DiscrStep := m;
//     end;
//   end;
// end;
DiscrStepSpeed := DiscrStep;
// Если DiscrStepTube=DiscrStepSpeed, то может возникать выч. погрешность при сходе вихрей
// Нужно сделать эти величины отличающимися, поэтому умножаем на 1.001
DiscrStepTube := DiscrStepSpeed*1.001;
ModelStep := 0;
ModelTime := 0.0;
AvgSpeedStep := 0;
lbModelStep.Caption := "";
lbModelTime.Caption := "";
// -- Визуализация дискретизации
// Сначала удаляем старую дискретизацию (если она была)
DiscreteRoot.DeleteChildren;
FreeVortexesRoot.DeleteChildren;
// Визуализация круговых рамок
for i:= 0 to High(VortexFrames) do
begin
  if i=CircleCount-1 then color:=clrMaroon else color:=clrNavy;
  VizualizeVortexFrame(VortexFrames[i], DiscreteRoot, color);
end;
GLPipe1.Nodes[0].X := -TubeLength/2;
GLPipe1.Nodes[1].X := TubeLength/2;
GLPipe1.Radius := TubeRadius-0.001;
GLPipe1.Slices := CircleNumPoints;
GLPipeOuter.Radius := TubeRadiusOuter-0.001;
GLPipeOuter.Slices := OutCircleNumPoints;
GLDiskOutside.InnerRadius := GLPipe1.Radius;
GLDiskOutside.OuterRadius := GLPipeOuter.Radius;
GLDiskInside.InnerRadius := GLPipe1.Radius;
GLDiskInside.OuterRadius := GLPipeOuter.Radius;
GLDiskInflow.InnerRadius := InflowRadiusInner;
GLDiskInflow.OuterRadius := InflowRadiusOuter;
GLDiskInflow.Visible := HasInflowRing;
// Визуализация расчетных точек
for i := 0 to High(CalcPoints) do
begin
  sph := TGLSphere.Create(Self);
  sph.Slices := 4;
  sph.Stacks := 4;
  sph.Radius := 0.008;
  sph.Material.FrontProperties.Emission.Initialize(clrOrangeRed);
  sph.Material.FrontProperties.Diffuse.Initialize(clrOrangeRed);
  sph.Position.X := CalcPoints[i].p.x;
  sph.Position.Y := CalcPoints[i].p.y;
  sph.Position.Z := CalcPoints[i].p.z;
  DiscreteRoot.AddChild(sph);
end;
// Визуализация рамок в приточном отверстии
for i := 0 to High(CalcFrames) do
begin
  lns:= TGLLines.Create(self);

```

```

for j := 0 to High(CalcFrames[i].Ribs) do
  Ins.AddNode(CalcFrames[i].Ribs[j].a.x, CalcFrames[i].Ribs[j].a.y, CalcFrames[i].Ribs[j].a.z);
  Ins.AddNode(CalcFrames[i].Ribs[0].a.x, CalcFrames[i].Ribs[0].a.y, CalcFrames[i].Ribs[0].a.z);
  Ins.NodesAspect := InaInvisible;
  Ins.LineColor.Initialize(clrOrangeRed);
  Ins.LineWidth := 1;
  DiscreteRoot.AddChild(Ins);
  sph := TGLSphere.Create(Self);
  sph.Slices := 4;
  sph.Stacks := 4;
  sph.Radius := 0.008;
  sph.Material.FrontProperties.Emission.Initialize(clrOrangeRed);
  sph.Material.FrontProperties.Diffuse.Initialize(clrOrangeRed);
  sph.Position.X := CalcFrames[i].p.x;
  sph.Position.Y := CalcFrames[i].p.y;
  sph.Position.Z := CalcFrames[i].p.z;
  DiscreteRoot.AddChild(sph);
end;
end;
// Дискретизация для случая,
// когда приточное отверстие представлено вихревыми рамками
procedure TForm1.InitVortexes1;
var
  i, j, k, kCalc, kVort, kBreak, InflowNumPoints: Integer;
  x, xStep, angleDelta, radiusCoeff1, radiusCoeff2, d, circleRibLength: Extended;
  rStep, curRadius: Extended;
  curCircleNumPoints, curCircleCount, ci: Integer;
  p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8: T3dPoint;
  n: T3dVector;
  fromRadius, toRadius: array of Extended;
begin
  // Дискретизация внутренней трубы (только вихри)
  angleDelta := 2*Pi/CircleNumPoints;
  x := -TubeLength/2;
  xStep := TubeLength/(CircleCount);
  SetLength(VortexFrames, CircleCount);
  for i:= 0 to CircleCount-1 do
    begin
      // Делаем пропуск в центре трубы (здесь будут вихревые рамки для притока)
      if i = CircleCount div 2 then
        x := x + xStep;
      // Инициализация вихревого кольца на трубе
      VortexFrames[i].RibsCount := CircleNumPoints;
      SetLength(VortexFrames[i].Ribs, CircleNumPoints);
      for j := 0 to CircleNumPoints-1 do
        begin
          SetPoint(p1, x, cos(j*angleDelta)*TubeRadius, sin(j*angleDelta)*TubeRadius);
          SetPoint(p2, x, cos((j+1)*angleDelta)*TubeRadius, sin((j+1)*angleDelta)*TubeRadius);
          VortexFrames[i].Ribs[j].a := p1;
          VortexFrames[i].Ribs[j].b := p2;
        end;
        x := x + xStep;
      end;
      circleRibLength := PointsDistance(VortexFrames[0].Ribs[0].a, VortexFrames[0].Ribs[0].b);
      // Инициализация 1-й точки отрыва
      SetLength(BreakPoints, 1);
      BreakPoints[0].VortexIndex := High(VortexFrames);
      BreakPoints[0].atInnerTube := True;
      // Инициализация расчетных точек на внутренней трубе
      x := -TubeLength/2+xStep/2;
      n.x := 0; n.y := 1; n.z := 0;
    end;
  end;

```

```

SetLength(CalcPoints, CircleCount);
for i:= 0 to CircleCount-1 do
begin
  CalcPoints[i].p.x := x;
  CalcPoints[i].p.y := TubeRadius;
  CalcPoints[i].p.z := 0;
  CalcPoints[i].n := n;
  x := x + xStep;
end;
// Дискретизация экранярующего профиля трубы (вихри и расч. точки)
if HasInflowRing then
begin
  SetLength(fromRadius,3);
  SetLength(toRadius,3);
  fromRadius[0] := TubeRadius;
  fromRadius[1] := InflowRadiusInner;
  fromRadius[2] := InflowRadiusOuter;
  toRadius[0] := InflowRadiusInner;
  toRadius[1] := InflowRadiusOuter;
  toRadius[2] := TubeRadiusOuter;
end
else
begin
  SetLength(fromRadius,1);
  SetLength(toRadius,1);
  fromRadius[0] := TubeRadius;
  toRadius[0] := TubeRadiusOuter;
end;
for i := 0 to high(fromRadius) do
begin
  // Берем за основу расстояние между кольцами на трубе и корректируем его
  rStep := TubeLength/(CircleCount);
  curCircleCount := Ceil((toRadius[i]-fromRadius[i])/rStep); //Round
  if (curCircleCount=0) then curCircleCount := 1;
  rStep := (toRadius[i]-fromRadius[i])/curCircleCount;
  curRadius := fromRadius[i]+rStep;
  kVort := Length(VortexFrames);
  kCalc := Length(CalcPoints);
  n.x := -1; n.y := 0; n.z := 0;
  SetLength(VortexFrames, kVort+curCircleCount);
  SetLength(CalcPoints, kCalc+curCircleCount);
  if (i=1) then
  begin
    InflowCalcPointMin := kCalc;
    InflowCalcPointMax := kCalc+curCircleCount-1;
    // Инициализируем еще 2 точки отрыва
    k := Length(BreakPoints);
    SetLength(BreakPoints, k + 2);
    BreakPoints[k].VortexIndex := kVort-1;
    BreakPoints[k].atInnerTube := False;
    BreakPoints[k+1].VortexIndex := kVort+curCircleCount-1;
    BreakPoints[k+1].atInnerTube := False;
  end;
  for ci := 1 to curCircleCount do
  begin
    angleDelta := 2 * ArcSin(circleRibLength/(2*curRadius));
    curCircleNumPoints := 4 * Trunc( Pi/2 / angleDelta );
    angleDelta := 2*Pi/curCircleNumPoints;
    VortexFrames[kVort].RibsCount := curCircleNumPoints;
    // Инициализация вихревого кольца
    SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs, curCircleNumPoints);
  end;
end;

```

```

for j := 0 to curCircleNumPoints-1 do
begin
  SetPoint(p1, TubeLength/2, cos(j*angleDelta)*curRadius, sin(j*angleDelta)*curRadius);
  SetPoint(p2, TubeLength/2, cos((j+1)*angleDelta)*curRadius, sin((j+1)*angleDelta)*curRadius);
  VortexFrames[kVort].Ribs[j].a := p1;
  VortexFrames[kVort].Ribs[j].b := p2;
end;
// Инициализация расч. точки
CalcPoints[kCalc].p.x := TubeLength/2;
CalcPoints[kCalc].p.y := curRadius - rStep/2;
CalcPoints[kCalc].p.z := 0;
CalcPoints[kCalc].n := n;
curRadius := curRadius + rStep;
Inc(kVort);
Inc(kCalc);
end;
end;
// Дискретизация внешней трубы (вихри и расч. точки)
angleDelta := 2 * ArcSin(circleRibLength/(2*TubeRadiusOuter));
OutCircleNumPoints := 4 * Trunc( Pi/2 / angleDelta );
angleDelta := 2*Pi/OutCircleNumPoints;
xStep := TubeLength/(CircleCount);
x := TubeLength/2 - xStep;
kVort := Length(VortexFrames);
kCalc := Length(CalcPoints);
n.x := 0; n.y := -1; n.z := 0;
SetLength(VortexFrames, kVort+CircleCount);
SetLength(CalcPoints, kCalc+CircleCount);
for i:= 0 to CircleCount-1 do
begin
  // Инициализация вихревого кольца на трубе
  VortexFrames[kVort].RibsCount := OutCircleNumPoints;
  SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs, OutCircleNumPoints);
  for j := 0 to OutCircleNumPoints-1 do
  begin
    SetPoint(p1, x, cos(j*angleDelta)*TubeRadiusOuter, sin(j*angleDelta)*TubeRadiusOuter);
    SetPoint(p2, x, cos((j+1)*angleDelta)*TubeRadiusOuter, sin((j+1)*angleDelta)*TubeRadiusOuter);
    VortexFrames[kVort].Ribs[j].a := p1;
    VortexFrames[kVort].Ribs[j].b := p2;
  end;
  // Инициализация расч. точки
  CalcPoints[kCalc].p.x := x + xStep/2;
  CalcPoints[kCalc].p.y := TubeRadiusOuter;
  CalcPoints[kCalc].p.z := 0;
  CalcPoints[kCalc].n := n;
  x := x - xStep;
  Inc(kVort);
  Inc(kCalc);
end;
end;
TubeCalcPointCount := Length(CalcPoints);
// Инициализация расчетных точек и вихревых рамок в приточном отверстии
MinCalcPointRibDistance := xStep/2;
InflowNumPoints := (CircleNumPoints div 2)*5;
kCalc := High(CalcPoints)+1; // индекс расчетной точки
kVort := High(VortexFrames)+1; // индекс вихревой рамки
SetLength(CalcPoints,High(CalcPoints)+1+InflowNumPoints);
SetLength(VortexFrames,High(VortexFrames)+1+InflowNumPoints);
angleDelta := 2*Pi/(CircleNumPoints div 2);
radiusCoeff1 := 0.45;
radiusCoeff2 := 0.77;
n.x := -1; n.y := 0; n.z := 0;

```

```

x := 0;
for i := 0 to (CircleNumPoints div 2) - 1 do
begin
  SetPoint(p1, x, cos((i-1)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff1, sin((i-1)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff1);
  SetPoint(p2, x, cos(i*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff1, sin(i*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff1);
  SetPoint(p3, x, cos((i-1)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2, sin((i-1)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2);
  SetPoint(p4, x, cos((i-0.5)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2, sin((i-0.5)*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2);
  SetPoint(p5, x, cos(i*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2, sin(i*angleDelta)*TubeRadius*radiusCoeff2);
  SetPoint(p6, x, cos((i-1)*angleDelta)*TubeRadius, sin((i-1)*angleDelta)*TubeRadius);
  SetPoint(p7, x, cos((i-0.5)*angleDelta)*TubeRadius, sin((i-0.5)*angleDelta)*TubeRadius);
  SetPoint(p8, x, cos(i*angleDelta)*TubeRadius, sin(i*angleDelta)*TubeRadius);
  SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs,3);
  SetPoint(VortexFrames[kVort].Ribs[0].a, x, 0, 0);
  VortexFrames[kVort].Ribs[0].b := p1;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].a := p1;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].b := p2;
  VortexFrames[kVort].Ribs[2].a := p2;
  VortexFrames[kVort].Ribs[2].b := VortexFrames[kVort].Ribs[0].a;
  CalcPoints[kCalc].p.x := x;
  CalcPoints[kCalc].p.y := (0 + p1.y + p2.y) / 3;
  CalcPoints[kCalc].p.z := (0 + p1.z + p2.z) / 3;
  CalcPoints[kCalc].n := n;
  for j := 0 to High(VortexFrames[kVort].Ribs) do
  begin
    d := PointVectorDistance(CalcPoints[kCalc].p, VortexFrames[kVort].Ribs[j].a, VortexFrames[kVort].Ribs[j].b);
    if MinCalcPointRibDistance>d then MinCalcPointRibDistance := d;
  end;
  Inc(kVort);
  Inc(kCalc);
  SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs,4);
  VortexFrames[kVort].Ribs[0].a := p1;
  VortexFrames[kVort].Ribs[0].b := p3;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].a := p3;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].b := p4;
  VortexFrames[kVort].Ribs[2].a := p4;
  SetPoint(VortexFrames[kVort].Ribs[2].b, x, (p1.y+p2.y)/2, (p1.z+p2.z)/2);
  VortexFrames[kVort].Ribs[3].a := VortexFrames[kVort].Ribs[2].b;
  VortexFrames[kVort].Ribs[3].b := VortexFrames[kVort].Ribs[0].a;
  CalcPoints[kCalc].p.x := x;
  CalcPoints[kCalc].p.y := (p1.y + 0.5*(p1.y+p2.y) + p3.y + p4.y) / 4;
  CalcPoints[kCalc].p.z := (p1.z + 0.5*(p1.z+p2.z) + p3.z + p4.z) / 4;
  CalcPoints[kCalc].n := n;
  for j := 0 to High(VortexFrames[kVort].Ribs) do
  begin
    d := PointVectorDistance(CalcPoints[kCalc].p, VortexFrames[kVort].Ribs[j].a, VortexFrames[kVort].Ribs[j].b);
    if MinCalcPointRibDistance>d then MinCalcPointRibDistance := d;
  end;
  Inc(kVort);
  Inc(kCalc);
  SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs,4);
  SetPoint(VortexFrames[kVort].Ribs[0].a, x, (p1.y+p2.y)/2, (p1.z+p2.z)/2);
  VortexFrames[kVort].Ribs[0].b := p4;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].a := p4;
  VortexFrames[kVort].Ribs[1].b := p5;
  VortexFrames[kVort].Ribs[2].a := p5;
  VortexFrames[kVort].Ribs[2].b := p2;
  VortexFrames[kVort].Ribs[3].a := p2;
  VortexFrames[kVort].Ribs[3].b := VortexFrames[kVort].Ribs[0].a;
  CalcPoints[kCalc].p.x := x;
  CalcPoints[kCalc].p.y := (0.5*(p1.y+p2.y) + p2.y + p4.y + p5.y) / 4;
  CalcPoints[kCalc].p.z := (0.5*(p1.z+p2.z) + p2.z + p4.z + p5.z) / 4;

```

```

CalcPoints[kCalc].n := n;
for j := 0 to High(VortexFrames[kVort].Ribs) do
begin
  d := PointVectorDistance(CalcPoints[kCalc].p, VortexFrames[kVort].Ribs[j].a, VortexFrames[kVort].Ribs[j].b);
  if MinCalcPointRibDistance > d then MinCalcPointRibDistance := d;
end;
Inc(kVort);
Inc(kCalc);
SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs, 4);
VortexFrames[kVort].Ribs[0].a := p3;
VortexFrames[kVort].Ribs[0].b := p6;
VortexFrames[kVort].Ribs[1].a := p6;
VortexFrames[kVort].Ribs[1].b := p7;
VortexFrames[kVort].Ribs[2].a := p7;
VortexFrames[kVort].Ribs[2].b := p4;
VortexFrames[kVort].Ribs[3].a := p4;
VortexFrames[kVort].Ribs[3].b := p3;
CalcPoints[kCalc].p.x := x;
CalcPoints[kCalc].p.y := (p3.y + p4.y + p6.y + p7.y) / 4;
CalcPoints[kCalc].p.z := (p3.z + p4.z + p6.z + p7.z) / 4;
CalcPoints[kCalc].n := n;
for j := 0 to High(VortexFrames[kVort].Ribs) do
begin
  d := PointVectorDistance(CalcPoints[kCalc].p, VortexFrames[kVort].Ribs[j].a, VortexFrames[kVort].Ribs[j].b);
  if MinCalcPointRibDistance > d then MinCalcPointRibDistance := d;
end;
Inc(kVort);
Inc(kCalc);
SetLength(VortexFrames[kVort].Ribs, 4);
VortexFrames[kVort].Ribs[0].a := p4;
VortexFrames[kVort].Ribs[0].b := p7;
VortexFrames[kVort].Ribs[1].a := p7;
VortexFrames[kVort].Ribs[1].b := p8;
VortexFrames[kVort].Ribs[2].a := p8;
VortexFrames[kVort].Ribs[2].b := p5;
VortexFrames[kVort].Ribs[3].a := p5;
VortexFrames[kVort].Ribs[3].b := p4;
CalcPoints[kCalc].p.x := x;
CalcPoints[kCalc].p.y := (p4.y + p5.y + p7.y + p8.y) / 4;
CalcPoints[kCalc].p.z := (p4.z + p5.z + p7.z + p8.z) / 4;
CalcPoints[kCalc].n := n;
for j := 0 to High(VortexFrames[kVort].Ribs) do
begin
  d := PointVectorDistance(CalcPoints[kCalc].p, VortexFrames[kVort].Ribs[j].a, VortexFrames[kVort].Ribs[j].b);
  if MinCalcPointRibDistance > d then MinCalcPointRibDistance := d;
end;
Inc(kVort);
Inc(kCalc);
end;
// Инициализация ребер отрыва
SetLength(BreakVortexRibs, CircleNumPoints);
x := TubeLength/2;
angleDelta := 2*Pi/CircleNumPoints;
for i := 0 to CircleNumPoints-1 do
begin
  SetPoint(p1, x, cos(i*angleDelta)*TubeRadius, sin(i*angleDelta)*TubeRadius);
  SetPoint(p2, x, cos((i+1)*angleDelta)*TubeRadius, sin((i+1)*angleDelta)*TubeRadius);
  BreakVortexRibs[i].a := p1;
  BreakVortexRibs[i].b := p2;
  BreakVortexRibs[i].VortexFrameInd := CircleNumPoints-1;
end;

```

```

end;
function TForm1.IsPointInsideTube(p: T3dPoint): Boolean;
begin
  Result := (Abs(p.x)<TubeLength/2) and (Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z))<TubeRadius);
end;
procedure TForm1.miAvgSpeedClick(Sender: TObject);
vari: Integer;
begin
frmAvgSpeed.cbCalcAvgSpeed.Checked := CalcAvgSpeed;
frmAvgSpeed.cbCalcAvgSpeedClick(nil); // Disable/enable other controls
if (Length(AvgSpeedPoints)>0) then
  begin
    frmAvgSpeed.UpDown1.Position := Length(AvgSpeedPoints);
    frmAvgSpeed.StringGrid1.RowCount := Length(AvgSpeedPoints) + 1;
    for i:=1 to Length(AvgSpeedPoints) do
      begin
        frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[0,i] := IntToStr(i);
        frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[1,i] := Format('%7.2f', [AvgSpeedPoints[i-1].x]);
        frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[2,i] := Format('%7.2f', [AvgSpeedPoints[i-1].y]);
        frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[3,i] := Format('%7.2f', [AvgSpeedPoints[i-1].z]);
      end;
    end
  else
    begin
      frmAvgSpeed.UpDown1.Position := 1;
      frmAvgSpeed.StringGrid1.RowCount := 2;
      frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[0,1] := '1';
      frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[1,1] := '';
      frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[2,1] := '';
      frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[3,1] := '';
    end;
  if (frmAvgSpeed.ShowModal = mrOk) then
    begin
      CalcAvgSpeed := frmAvgSpeed.cbCalcAvgSpeed.Checked;
      if CalcAvgSpeed then
        begin
          SetLength(AvgSpeedPoints, frmAvgSpeed.StringGrid1.RowCount-1);
          for i := 1 to frmAvgSpeed.StringGrid1.RowCount-1 do
            begin
              AvgSpeedPoints[i-1].x := StrToFloat( frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[1,i] );
              AvgSpeedPoints[i-1].y := StrToFloat( frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[2,i] );
              AvgSpeedPoints[i-1].z := StrToFloat( frmAvgSpeed.StringGrid1.Cells[3,i] );
            end;
          end
        else
          begin
            SetLength(AvgSpeedPoints, 0);
          end;
          SetLength(AvgSpeeds, Length(AvgSpeedPoints));
          for i := 0 to High(AvgSpeeds) do
            SetVector(AvgSpeeds[i], 0, 0, 0);
          AvgSpeedStep := 0;
        end;
      end;
procedure TForm1.miAvgSpeedResultsClick(Sender: TObject);
vari: Integer;
begin
  frmAvgSpeedResults.Memo1.Lines.Clear;
  frmAvgSpeedResults.Memo1.Lines.Add('N | Координаты точки | Средняя скорость |');

  frmAvgSpeedResults.

```

```

Memo1.Lines.Add('-----+-----+');
for i := 0 to High(AvgSpeeds) do
begin
  frmAvgSpeedResults.Memo1.Lines.Add(
    Format(' %2d | ( %5.3f; %5.3f; %5.3f ) | ( %7.4f; %7.4f; %7.4f ) |',
      [i+1, AvgSpeedPoints[i].x, AvgSpeedPoints[i].y, AvgSpeedPoints[i].z,
        AvgSpeeds[i].x, AvgSpeeds[i].y, AvgSpeeds[i].z]
    );
end;
frmAvgSpeedResults.Memo1.Lines.Add('-----+-----+');
frmAvgSpeedResults.ShowModal;
end;
procedure TForm1.miExitClick(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;
procedure TForm1.MoveVortexFramesOld;
var
  i, j, k, rCount: Integer;
  v: T3dVector;
  pr: T3dPoint;
  dt, rNew, rOld, rTmp, r, TubeLength2, TubeLength2Out, xOld, xNew, TubeDiscr: Extended;
  TubeRadiusIn, TubeRadiusOut: Extended;
  dx, dr, scaler: Extended;
  NewFrames, TmpFrames: TVortexFrameArray;
  NewFrame: TVortexFrame;
  str: String;
  p, p2: T3dPoint;
  DisappearFlag: Boolean;
  xMin, xMax, xAvg, rMin, rMax, rAvg: Extended;
  rad: array of Extended;
begin
  //dt := abs(DiscrStep/Speed); //0.01
  dt := StrToFloat(edStep.Text);
  // if CorrectSymmetry then
  //  SymmetryAccuracy := StrToFloat(edSymmetryAccuracy.Text);
  TubeLength2 := TubeLength/2;
  TubeLength2Out := TubeLength/2 + DiscrStepTube;
  TubeRadiusIn := TubeRadius - DiscrStepTube;
  TubeRadiusOut := TubeRadiusOuter + DiscrStepTube;
  // 1. Перемещение существующих свободных вихр. рамок (расчет новых положений)
  SetLength(TmpFrames, Length(FreeVortexFrames));
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
  begin
    rCount := Length(FreeVortexFrames[i].Ribs);
    SetLength(TmpFrames[i].Ribs, rCount);
    for j := 0 to rCount - 1 do
    begin
      v := CountSpeed(FreeVortexFrames[i].Ribs[j].b);
      // проверка пересечения точки с областью
      with FreeVortexFrames[i].Ribs[j] do
      begin
        SetPoint(p, b.x + v.x*dt, b.y + v.y*dt, b.z + v.z*dt);
        xOld := abs(b.x);
        xNew := abs(p.x);
        // Проверка пересечения с трубой
        if (xOld < TubeLength2) or (xNew < TubeLength2) then
          begin

```

```

rOld := Sqrt(Sqr(b.y)+Sqr(b.z));
rNew := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
if (xOld<TubeLength2)and(xNew<TubeLength2) then
begin
// В положения "до" и "после" координата X в пределах длины трубы
if (rOld<TubeRadiusIn)and(rNew>TubeRadiusIn) then
begin
r := (TubeRadiusIn-rOld)/(rNew-rOld);
// Смещаемся вдоль вектора скорости чуть дальше точки пересечения
r := r + 0.5*(1-r);
SetPoint(p, b.x + v.x*dt*r, b.y + v.y*dt*r, b.z + v.z*dt*r);
// Находим проекцию точки на цилиндр
rTmp := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
p.y := p.y * (TubeRadiusIn-0.001) / rTmp;
p.z := p.z * (TubeRadiusIn-0.001) / rTmp;
// TODO: по-хорошему, подобный код (смещение и нахождение проекции)
// нужно делать в строках ~780, ~790, ~800
end
else if (rOld>TubeRadiusOut)and(rNew<TubeRadiusOut) then
begin
r := (rOld-TubeRadiusOut)*0.999/(rOld-rNew); // умножаем на 0.999, чтобы чуть-чуть отодвигалось от
TubeRadiusOut
SetPoint(p, b.x + v.x*dt*r, b.y + v.y*dt*r, b.z + v.z*dt*r);
end;
end
else
begin
// Только в одном положении ("до" или "после") координата X в пределах длины трубы
if (rOld<TubeRadiusIn)and(rNew>TubeRadiusIn) then
begin
r := ((TubeRadiusIn-0.001)-rOld)/(rNew-rOld);
SetPoint(p2, b.x + v.x*dt*r, b.y + v.y*dt*r, b.z + v.z*dt*r);
if (p2.x<=TubeLength2) then
begin
// Есть пересечение с внутренней стороной трубы. Меняем точку p
p := p2;
end
else
begin
end;
end
else if (rOld>TubeRadiusOut)and(rNew<TubeRadiusOut) then
begin
r := (rOld-TubeRadiusOut)*0.999/(rOld-rNew); // умножаем на 0.999, чтобы чуть-чуть отодвигалось от
TubeRadiusOut
SetPoint(p2, b.x + v.x*dt*r, b.y + v.y*dt*r, b.z + v.z*dt*r);
if (p2.x<=TubeLength2) then
begin
// Пересечение с трубой есть. Меняем точку p
p := p2;
end;
end;
end;
end;
end;
// Если точка слишком близко к кромке трубы, то отодвигаем ее по окружности
xNew := abs(p.x); // Точка p могла измениться, обновим xNew
if (xNew>TubeLength2)and(xNew<TubeLength2Out) then
begin
rNew := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
if (rNew>TubeRadiusIn)and(rNew<TubeRadiusOut) then
begin

```

```

pr.x := TubeLength2;
pr.y := p.y*TubeRadius/rNew;
pr.z := p.z*TubeRadius/rNew;
r := PointsDistance(p,pr);
if r<DiscrStepTube then
begin
  p.x := pr.x + (p.x-pr.x) * DiscrStepTube/r;
  p.y := pr.y + (p.y-pr.y) * DiscrStepTube/r;
  p.z := pr.z + (p.z-pr.z) * DiscrStepTube/r;
end;
end;
end;
TmpFrames[i].Ribs[j].b := p;
end;
k := (j + 1) mod rCount;
TmpFrames[i].Ribs[k].a := TmpFrames[i].Ribs[j].b;
end;
// Корректируем радиусы и абсциссы, если они различаются в пределах допустимого отклонения
// TODO: теоретически, после коррекции может получиться, что рамки выходят за границы
if (CorrectSymmetry) then
begin
  xMin := TmpFrames[i].Ribs[0].a.x; xMax := xMin; xAvg := 0;
  rMax := 0; rMin := 0; rAvg := 0;
  SetLength(rad, rCount);
  for j := 0 to rCount - 1 do
  begin
    r := Sqrt(
      Sqr(TmpFrames[i].Ribs[j].a.y) + Sqr(TmpFrames[i].Ribs[j].a.z)
    );
    rAvg := rAvg + r;
    if (rMax = 0) or (rMax < r) then rMax := r;
    if (rMin = 0) or (rMin > r) then rMin := r;
    if (xMax < TmpFrames[i].Ribs[j].a.x) then
      xMax := TmpFrames[i].Ribs[j].a.x;
    if (xMin > TmpFrames[i].Ribs[j].a.x) then
      xMin := TmpFrames[i].Ribs[j].a.x;
    xAvg := xAvg + TmpFrames[i].Ribs[j].a.x;
    rad[j] := r; // save radius, since it is needed below (a little optimization)
  end;
  if (xMax - xMin < SymmetryAccuracy) and (rMax - rMin < SymmetryAccuracy) then
  begin
    rAvg := rAvg / rCount;
    xAvg := xAvg / rCount;
    for j := 0 to rCount - 1 do
    begin
      TmpFrames[i].Ribs[j].a.x := xAvg;
      // TODO: rMin is good choice only inside tube, outside should be rMax
      TmpFrames[i].Ribs[j].a.y := rMin / rad[j] * TmpFrames[i].Ribs[j].a.y;
      TmpFrames[i].Ribs[j].a.z := rMin / rad[j] * TmpFrames[i].Ribs[j].a.z;
      if j=0 then k := rCount-1 else k := j-1;
      TmpFrames[i].Ribs[k].b := TmpFrames[i].Ribs[j].a;
    end;
  end;
end;
end;
end;
// 2. Сход новой вихревой рамки (расчет положения)
SetLength(NewFrame.Ribs,CircleNumPoints);
NewFrame.RibsCount := CircleNumPoints;
NewFrame.Gamma := Gamma[CircleCount-1];
for i := 0 to CircleNumPoints-1 do
begin

```

```

with VortexFrames[CircleCount-1].Ribs[i] do
begin
  v := CountSpeed(a);
  SetPoint(p, a.x + v.x*dt, a.y + v.y*dt, a.z + v.z*dt);
end;
// Если точка слишком близко к трубе, то отодвигаем ее
if (p.x<TubeLength2Out) then
begin
  r := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
  if (r>TubeRadiusIn)and(r<TubeRadiusOut) then
  begin
    pr.x := TubeLength2;
    pr.y := p.y*TubeRadius/r;
    pr.z := p.z*TubeRadius/r;
    dr := PointsDistance(p,pr);
    if dr<DiscrStepTube then
    begin
      p.x := pr.x + (p.x-pr.x) * DiscrStepTube/dr;
      p.y := pr.y + (p.y-pr.y) * DiscrStepTube/dr;
      p.z := pr.z + (p.z-pr.z) * DiscrStepTube/dr;
    end;
    // Если точка сдвинулась внутрь трубы, то делаем проекцию точки на границы трубы
    if p.x<TubeLength2 then
    begin
      rNew := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
      if (rNew>TubeRadiusIn)and(rNew<TubeRadiusOut) then
      begin
        if rNew<TubeRadius then
          scaler := TubeRadiusIn/rNew
        else
          scaler := TubeRadiusOut/rNew;
        p.y := p.y * scaler;
        p.z := p.z * scaler;
      end;
    end;
  end;
end;
NewFrame.Ribs[i].a := p;
{
p := VortexFrames[CircleCount-1].Ribs[i].a;
v := CountSpeed(p);
SetPoint(NewFrame.Ribs[i].a, p.x + v.x*dt, p.y + v.y*dt, p.z + v.z*dt);
// Если точка слишком близко к трубе, то отодвигаем ее
with NewFrame.Ribs[i] do
begin
  if (a.x<TubeLength2Out) then
  begin
    r := Sqrt(Sqr(a.y)+Sqr(a.z));
    if (r>TubeRadiusIn)and(r<TubeRadiusOut) then
    begin
      pr.x := TubeLength2;
      pr.y := a.y*TubeRadius/r;
      pr.z := a.z*TubeRadius/r;
      dr := PointsDistance(a,pr);
      if dr<DiscrStepTube then
      begin
        p.x := pr.x + (a.x-pr.x) * DiscrStepTube/dr;
        p.y := pr.y + (a.y-pr.y) * DiscrStepTube/dr;
        p.z := pr.z + (a.z-pr.z) * DiscrStepTube/dr;
      end;
      // Если точка сдвинулась внутрь трубы, то делаем проекцию точки на границы трубы

```

```

if p.x<TubeLength2 then
begin
  rNew := Sqrt(Sqr(p.y)+Sqr(p.z));
  if (rNew>TubeRadiusIn)and(rNew<TubeRadiusOut) then
  begin
    if rNew<TubeRadius then
      scaler := TubeRadiusIn/rNew
    else
      scaler := TubeRadiusOut/rNew;
    p.y := p.y * scaler;
    p.z := p.z * scaler;
  end;
end;
NewFrame.Ribs[i].a := p;
end;
end;
end;
}
// Возможно, имеет смысл тут делать какие-то проверки для пересечения с трубой
// Но таких ситуаций быть не должно (при нормальном шаге по времени и
// при отсутствии странных эффектов в ходе моделирования)
k := i - 1;
if (k<0) then k := CircleNumPoints-1;
NewFrame.Ribs[k].b := NewFrame.Ribs[i].a;
end;
// 3. Обновление положений существующих свободных вихр. рамок
// и удаление рамок, попавших во всас. отверстие
k := 0;
for i := 0 to High(TmpFrames) do
begin
  DisappearFlag := True;
  for j := 0 to High(TmpFrames[i].Ribs) do
    if TmpFrames[i].Ribs[j].a.x>0 then
    begin
      DisappearFlag := False;
      break;
    end;
  if DisappearFlag then
  begin
    // У всех точек отрицат. абсцисса. Проверим радиус для первой точки
    // (для остальных можно не проверять, т.к. вся рамка либо внутри трубы, либо снаружи)
    if Sqrt(Sqr(TmpFrames[i].Ribs[0].a.y)+Sqr(TmpFrames[i].Ribs[0].a.z))>TubeRadius then
      DisappearFlag := False;
    end;
  if not DisappearFlag then
  begin
    for j := 0 to High(TmpFrames[i].Ribs) do
      FreeVortexFrames[k].Ribs[j] := TmpFrames[i].Ribs[j];
    Inc(k);
  end;
end;
SetLength(FreeVortexFrames,k);
// 4. Обновление положения новой вихревой рамки
k := High(FreeVortexFrames) + 1;
SetLength(FreeVortexFrames, k + 1);
FreeVortexFrames[k] := NewFrame;
// Отображение свободных вихревых рамок
FreeVortexesRoot.DeleteChildren;
for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
begin
  VizualizeVortexFrame(FreeVortexFrames[i],FreeVortexesRoot,clrNavy);

```

```

end;
// Отображение времени моделирования
Inc(ModelStep);
ModelTime := ModelTime + dt;
lbModelStep.Caption := 'Шар: ' + IntToStr(ModelStep);
lbModelTime.Caption := 'Время: ' + FloatToStr(ModelTime);
//DumpVortexFrames;
end;
procedure TForm1.MoveVortexFrames;
function SelectIntersectionPoint(x1,y1,x2,y2,xNew,yNew,xOld,yOld: Extended;
                                var iPnt: T3dPoint): Boolean;
var k1, k2: Extended;
begin
  Result := False;
  if (abs(y2-y1) > abs(x2-x1)) then
  begin
    k1 := (y1-yOld)/(yNew-yOld);
    k2 := (y2-yOld)/(yNew-yOld);
  end
  else
  begin
    k1 := (x1-xOld)/(xNew-xOld);
    k2 := (x2-xOld)/(xNew-xOld);
  end;
  // Иногда возникает погрешность вычислений, поэтому границы не строго от 0 до 1...
  if (k1 < k2) and (k1 < 1.000001) and (k1 > -0.000001) then
  begin
    iPnt.x := x1;
    iPnt.y := y1;
    Result := True;
  end
  else
  if (k2 < k1) and (k2 < 1.000001) and (k2 > -0.000001) then
  begin
    iPnt.x := x2;
    iPnt.y := y2;
    Result := True;
  end;
end;
var
  i, j, k, rCount, eqResult: Integer;
  dt, xOld, xNew, yOld, yNew, x1, x2, y1, y2, alpha, r, scaler: Extended;
  coeffK, coeffB, StickyAccuracy: Extended;
  TubeLength2, TubeLength2Out, TubeRadiusIn, TubeRadiusOut: Extended;
  TmpFrames: TVortexFrameArray;
  v: T3dVector;
  p, iPnt: T3dPoint;
  iPoints: array of T3dPoint;
  NewFrame: TVortexFrame;
  DisappearFlag: Boolean;
  NewFrames: array of TVortexFrame;
begin
  dt := StrToFloat(edStep.Text);
  TubeLength2 := TubeLength/2;
  TubeLength2Out := TubeLength/2 + DiscrStepTube;
  TubeRadiusIn := TubeRadius - DiscrStepTube;
  TubeRadiusOut := TubeRadiusOuter + DiscrStepTube;
  StickyAccuracy := DiscrStep/100;
  // 1. Перемещение существующих свободных вихр. рамок (расчет новых положений)
  SetLength(TmpFrames, Length(FreeVortexFrames));
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do

```

```

begin
  rCount := Length(FreeVortexFrames[i].Ribs);
  SetLength(TmpFrames[i].Ribs,rCount);
  TmpFrames[i].RibsCount := rCount;
  TmpFrames[i].Gamma := FreeVortexFrames[i].Gamma;
  v := CountSpeed(FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a);
  // TODO: check Z-component of the speed (it should be 0)
  with FreeVortexFrames[i].Ribs[0] do
  begin
    SetLength(iPoints, 0);
    SetPoint(p, a.x + v.x*dt, a.y + v.y*dt, a.z + v.z*dt);
    if DebugMode and (abs(p.z)>1e-6) then
    begin
      ShowMessage('p.z > 0 for for frame ' + IntToStr(i+1));
    end;
    // z-компонента всегда должна быть равна практически 0.
    // Обнуляем ее явно, иначе из-за специфики расчета вихри могут вылетать за границу
    // (а также непредсказуемая погрешность будет накапливаться)
    p.z := 0;
    xOld := abs(a.x); yOld := abs(a.y);
    xNew := abs(p.x); yNew := abs(p.y);
    if ((xOld<TubeLength2Out)or(xNew<TubeLength2Out))
      and
      ((yOld>TubeRadiusIn)and(yOld<TubeRadiusOut)or
      (yNew>TubeRadiusIn)and(yNew<TubeRadiusOut)
      ) then
    begin
      // Находим коэффициенты уравнения прямой
      коэффК := (yNew-yOld)/(xNew-xOld);
      коэффВ := yNew - коэффК*xNew;
      // 1. Проверяем пересечение с внутренним радиусом
      if (yOld<TubeRadiusIn)and(yNew>TubeRadiusIn)or
        (yNew<TubeRadiusIn)and(yOld>TubeRadiusIn) then
      begin
        iPnt.x := (TubeRadiusIn - коэффВ)/коэффК;
        if (iPnt.x < TubeLength2) then
          begin
            iPnt.y := TubeRadiusIn;
            SetLength(iPoints,Length(iPoints)+1);
            iPoints[High(iPoints)] := iPnt;
          end;
        end;
      // 2. Проверяем пересечение с внешним радиусом
      if (yOld<TubeRadiusOut)and(yNew>TubeRadiusOut)or
        (yNew<TubeRadiusOut)and(yOld>TubeRadiusOut) then
      begin
        iPnt.x := (TubeRadiusOut - коэффВ)/коэффК;
        if (iPnt.x < TubeLength2) then
          begin
            iPnt.y := TubeRadiusOut;
            SetLength(iPoints,Length(iPoints)+1);
            iPoints[High(iPoints)] := iPnt;
          end;
        end;
      // 3. Проверяем пересечение с экраном
      if (xNew<TubeLength2Out)and(xOld>TubeLength2Out)or
        (xOld<TubeLength2Out)and(xNew>TubeLength2Out)then
      begin
        iPnt.y := коэффК*TubeLength2Out + коэффВ;
        if (iPnt.y>TubeRadius)and(iPnt.y<TubeRadiusOuter) then
          begin

```

```

    iPnt.x := TubeLength2Out;
    SetLength(iPoints,Length(iPoints)+1);
    iPoints[High(iPoints)] := iPnt;
end;
end;
// 4. Проверяем пересечение с окружностью у внутреннего радиуса
eqResult := SolveQuadricEquation(
    coeffK*coeffK+1,
    2*(coeffK*(coeffB-TubeRadius)-TubeLength2),
    coeffB*coeffB - 2*coeffB*TubeRadius + TubeRadius*TubeRadius +
    TubeLength2*TubeLength2 - DiscrStepTube*DiscrStepTube,
    x1, x2);
if eqResult>1 then
begin
    y1 := coeffK*x1 + coeffB;
    y2 := coeffK*x2 + coeffB;
    if SelectIntersectionPoint(x1,y1,x2,y2,xNew,yNew,xOld,yOld,iPnt) then
    begin
        SetLength(iPoints,Length(iPoints)+1);
        iPoints[High(iPoints)] := iPnt;
    end;
end;
// 5. Проверяем пересечение с окружностью у внешнего радиуса
eqResult := SolveQuadricEquation(
    coeffK*coeffK+1,
    2*(coeffK*(coeffB-TubeRadiusOuter)-TubeLength2),
    coeffB*coeffB - 2*coeffB*TubeRadiusOuter + TubeRadiusOuter*TubeRadiusOuter +
    TubeLength2*TubeLength2 - DiscrStepTube*DiscrStepTube,
    x1, x2);
if eqResult>1 then
begin
    y1 := coeffK*x1 + coeffB;
    y2 := coeffK*x2 + coeffB;
    if SelectIntersectionPoint(x1,y1,x2,y2,xNew,yNew,xOld,yOld,iPnt) then
    begin
        SetLength(iPoints,Length(iPoints)+1);
        iPoints[High(iPoints)] := iPnt;
    end;
end;
// Если есть пересечение с границей, то сдвигаем точку p
if Length(iPoints)>0 then
begin
    // Выбираем точку пересечения
    iPnt := iPoints[0];
    for k := 1 to High(iPoints) do
        SelectIntersectionPoint(
            iPnt.x,iPnt.y,iPoints[k].x,iPoints[k].y,xNew,yNew,yOld,yOld,
            iPnt
        );
    // Меняем точку p и чуть-чуть отодвигаем ее от границы
    p.x := (iPnt.x - xOld)*0.999 + xOld;
    p.y := (iPnt.y - yOld)*0.999 + yOld;
    // Предотвращаем залипание вихрей возле границы
    if abs(p.y-TubeRadiusIn)<StickyAccuracy then
    begin
        p.y := p.y - 0.001;
        v := CountSpeed(p);
        p.x := p.x + v.x*dt*0.3;
    end
    else if abs(p.y-TubeRadiusOut)<StickyAccuracy then
    begin

```

```

    p.y := p.y + 0.001;
    v := CountSpeed(p);
    p.x := p.x + v.x*dt*0.3;
end
else if abs(p.x-TubeLength2Out)<StickyAccuracy then
begin
    p.x := p.x + 0.001;
    v := CountSpeed(p);
    p.y := p.y + v.y*dt*0.3;
end;
end;
end;
// Записываем точку p
TmpFrames[i].Ribs[0].a := p;
TmpFrames[i].Ribs[rCount-1].b := p;
// По окружности формируем остальные точки
alpha := 2 * Pi / rCount;
r := Sqrt(Sqr(p.y) + Sqr(p.z));
for j := 1 to rCount-1 do
begin
    SetPoint(TmpFrames[i].Ribs[j].a, p.x, r*cos(j*alpha), r*sin(j*alpha));
    TmpFrames[i].Ribs[j-1].b := TmpFrames[i].Ribs[j].a;
end;
end;
(*
// 2. Сход новой вихревой рамки (расчет положения)
SetLength(NewFrame.Ribs,CircleNumPoints);
NewFrame.RibsCount := CircleNumPoints;
NewFrame.Gamma := Gamma[CircleCount-1];
with VortexFrames[CircleCount-1].Ribs[0] do
begin
    v := CountSpeed(a);
/////
if (abs(v.z)>1e-6) then
begin
    ShowMessage("Z-component of speed for new frame is non-zero!");
end;
/////
SetPoint(p, a.x + v.x*dt, a.y + v.y*dt, a.z + v.z*dt);
// Если точка слишком близко к трубе, то отодвигаем ее
if (p.x<TubeLength2Out)and(p.y>TubeRadiusIn) then
begin
    if p.y>TubeRadius then
begin
        p.x := TubeLength2Out * 1.001;
end
else
if p.x<TubeLength2 then
begin
        p.y := TubeRadiusIn * 0.999;
end
else
begin
        r := Sqrt(Sqr(p.x-a.x)+Sqr(p.y-a.y));
        if (r<=DiscrStepTube) then
begin
            scaler := (DiscrStepTube / r * 1.001) * dt;
            SetPoint(p, a.x + v.x*scaler, a.y + v.y*scaler, a.z + v.z*scaler);
end;
end;
end;
end;

```

```

end;
end;
NewFrame.Ribs[0].a := p;
NewFrame.Ribs[CircleNumPoints-1].b := p;
// По окружности формируем остальные точки
alpha := 2 * Pi / CircleNumPoints;
r := Sqrt(Sqr(p.y) + Sqr(p.z));
for i := 1 to CircleNumPoints-1 do
begin
  SetPoint(NewFrame.Ribs[i].a, p.x, r*cos(i*alpha), r*sin(i*alpha));
  NewFrame.Ribs[i-1].b := NewFrame.Ribs[i].a;
end;
*)
// 2. Сход новых вихревых рамок (расчет положения)
SetLength(NewFrames, Length(BreakPoints));
for i := 0 to High(BreakPoints) do
begin
  NewFrames[i].RibsCount := VortexFrames[BreakPoints[i].VortexIndex].RibsCount;
  SetLength(NewFrames[i].Ribs, NewFrames[i].RibsCount);
  NewFrames[i].Gamma := Gamma[ BreakPoints[i].VortexIndex ]; // TODO! Why -1???
  with VortexFrames[BreakPoints[i].VortexIndex].Ribs[0] do
  begin
    v := CountSpeed(a);
    if DebugMode and (abs(v.z)>1e-6) then
    begin
      ShowMessage('Z-component of speed for new frame ' + IntToStr(i+1) + ' is non-zero!');
    end;
    SetPoint(p, a.x + v.x*dt, a.y + v.y*dt, a.z + v.z*dt);
    // Если точка слишком близко к трубе, то отодвигаем ее
    if BreakPoints[i].atInnerTube then
    begin
      // Это точка отрыва у внутренней трубы
      if (p.x<TubeLength2Out)and(p.y>TubeRadiusIn) then
      begin
        if p.y>TubeRadius then
        begin
          p.x := TubeLength2Out * 1.001;
        end
        else
        if p.x<TubeLength2 then
        begin
          p.y := TubeRadiusIn * 0.999;
        end
        else
        begin
          r := Sqrt(Sqr(p.x-a.x)+Sqr(p.y-a.y));
          if (r<=DiscrStepTube) then
          begin
            scaler := (DiscrStepTube / r * 1.001) * dt;
            SetPoint(p, a.x + v.x*scaler, a.y + v.y*scaler, a.z + v.z*scaler);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
end;
end;
// Это точки отрыва у приточной щели на торце трубы
if (p.x<TubeLength2Out) then
  p.x := TubeLength2Out * 1.001;
end;
end;
end;

```

```

NewFrames[i].Ribs[0].a := p;
NewFrames[i].Ribs[NewFrames[i].RibsCount-1].b := p;
// По окружности формируем остальные точки
alpha := 2 * Pi / NewFrames[i].RibsCount;
r := Sqrt(Sqr(p.y) + Sqr(p.z));
for j := 1 to NewFrames[i].RibsCount-1 do
begin
  SetPoint(NewFrames[i].Ribs[j].a, p.x, r*cos(j*alpha), r*sin(j*alpha));
  NewFrames[i].Ribs[j-1].b := NewFrames[i].Ribs[j].a;
end;
end;
// 3. Обновление положений существующих свободных вихр. рамок
// и удаление рамок, попавших во всас. отверстие
k := 0;
for i := 0 to High(TmpFrames) do
begin
  DisappearFlag := True;
  for j := 0 to High(TmpFrames[i].Ribs) do
  if TmpFrames[i].Ribs[j].a.x > 0 then
  begin
    DisappearFlag := False;
    break;
  end;
  if DisappearFlag then
  begin
    // У всех точек отрицат. абсцисса. Проверим радиус для первой точки
    // (для остальных можно не проверять, т.к. вся рамка либо внутри трубы, либо снаружи)
    if Sqrt(Sqr(TmpFrames[i].Ribs[0].a.y) + Sqr(TmpFrames[i].Ribs[0].a.z)) > TubeRadiusOuter then
      DisappearFlag := False;
    end;
    if not DisappearFlag then
    begin
      FreeVortexFrames[k] := TmpFrames[i];
      Inc(k);
    end;
  end;
end;
SetLength(FreeVortexFrames, k);
(*
// 4. Обновление положения новой вихревой рамки
k := High(FreeVortexFrames) + 1;
SetLength(FreeVortexFrames, k + 1);
FreeVortexFrames[k] := NewFrame;
*)
// 4. Обновление положения новых вихревых рамок
k := Length(FreeVortexFrames);
SetLength(FreeVortexFrames, k + Length(BreakPoints));
for i := 0 to High(BreakPoints) do
begin
  FreeVortexFrames[k+i] := NewFrames[i];
end;
if DebugMode then
for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
begin
  if (FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.y > TubeRadiusIn) and
    (FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.x < TubeLength2) then
  begin
    ShowMessage('Frame ' + IntToStr(i+1) + ' is outside');
  end;
end;
end;
// Отображение свободных вихревых рамок
FreeVortexesRoot.DeleteChildren;

```

```

for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
begin
  VizualizeVortexFrame(FreeVortexFrames[i],FreeVortexesRoot,clrNavy);
end;
// Отображение времени моделирования
Inc(ModelStep);
ModelTime := ModelTime + dt;
lbModelStep.Caption := 'Шаг: ' + IntToStr(ModelStep);
lbModelTime.Caption := 'Время: ' + FloatToStr(ModelTime);
end;
procedure TForm1.N3Click(Sender: TObject);
begin
  frmFlatProjection.ShowModal;
end;
procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
var
  i, j, k: Integer;
  r,
rSum, rMax, rMin, xMax, xMin, xAvg: Extended;
begin
  frmFreeVortexes.Memo1.Lines.Clear;
  frmFreeVortexes.Memo1.Lines.Add('N | Ср. радиус | Откл. по радиусу | Откл. по абсциссе | Абсцисса |
Интенсивн. |');
  frmFreeVortexes.
Memo1.Lines.Add('---+-----+-----+-----+-----+');
  k := 1;
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
  begin
    xMin := FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.x;
    xMax := FreeVortexFrames[i].Ribs[0].a.x;
    rSum := 0; rMax := 0; rMin := 0; xAvg := 0;
    for j := 0 to High(FreeVortexFrames[i].Ribs) do
    begin
      r := Sqrt(
        Sqr(FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.y) + Sqr(FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.z)
      );
      rSum := rSum + r;
      if (rMax = 0) or (rMax < r) then rMax := r;
      if (rMin = 0) or (rMin > r) then rMin := r;
      if (xMax < FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.x) then
        xMax := FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.x;
      if (xMin > FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.x) then
        xMin := FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.x;
      xAvg := xAvg + FreeVortexFrames[i].Ribs[j].a.x;
    end;
    rSum := rSum / Length(FreeVortexFrames[i].Ribs);
    xAvg := xAvg / Length(FreeVortexFrames[i].Ribs);
    frmFreeVortexes.Memo1.Lines.Add(
      Format('%2d | %7.4f | %11.8f | %11.8f | %11.8f | %11.8f |',
        [k, rSum, rMax-rMin, xMax-xMin, xAvg, FreeVortexFrames[i].Gamma])
    );
    Inc(k);
  end;
  frmFreeVortexes.
Memo1.Lines.Add('---+-----+-----+-----+');
  frmFreeVortexes.ShowModal;
end;
procedure TForm1.btnDeleteFlowLinesClick(Sender: TObject);
begin
  FlowLinesRoot.DeleteChildren;
  FlowLinesRoot.DoChanges;

```

```

end;
procedure TForm1.btnFlowLineClick(Sender: TObject);
var
  p: T3dPoint;
begin
  try
    SetPoint(p,StrToFloat(edFlowLineX.Text),StrToFloat(edFlowLineY.Text),StrToFloat(edFlowLineZ.Text));
    DrawFlowLine(p,StrToFloat(edFlowLineLength.Text),StrToFloat(edFlowLineStep.Text));
  except
    ShowMessage('Введите корректные параметры для построения линии тока!');
  end;
end;
procedure TForm1.btnFlowLineCoordsClick(Sender: TObject);
begin
  fFlowLineCoords.ShowModal;
end;
procedure TForm1.BuildSystem;
begin
  BuildSystem1;
end;
// Система для случая, когда приточное отверстие представлено вихревыми рамками
procedure TForm1.BuildSystem1;
var
  p, i, k, n: Integer;
  v: T3dVector;
begin
  n := High(CalcPoints) + 1;
  SetLength(Matrx,n,n+1);
  for p := 0 to n-1 do
  begin
    for k := 0 to n-1 do
    begin
      v.x := 0; v.y := 0; v.z := 0;
      for i := 0 to High(VortexFrames[k].Ribs) do
      for p := 0 to n-1 do
        v := VectorsAdd(v,funcG(VortexFrames[k].Ribs[i].a,VortexFrames[k].Ribs[i].b,CalcPoints[p].p));
        Matrx[p,k] := ScalarProduct(v,CalcPoints[p].n);
      end;
      if p<TubeCalcPointCount then
      begin
        if HasInflowRing and (p>=InflowCalcPointMin) and (p<=InflowCalcPointMax) then
          Matrx[p,n] := -InflowSpeed
        else
          Matrx[p,n] := 0;
        end
      else
        Matrx[p,n] := -Speed;
      end; end;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var i,k: Integer; r1,r2: Extended;
str: String;
begin
  str := '';
  for i := 0 to High(FreeVortexFrames) do
  begin
    r1:= VectorModulus(RibToVector(FreeVortexFrames[i].Ribs[0]));
    for k := 1 to High(FreeVortexFrames[i].Ribs) do
    begin
      r2:= VectorModulus(RibToVector(FreeVortexFrames[i].Ribs[k]));
      if abs(r2-r1)>0.001 then
      begin

```

```

    str := str + IntToStr(i) + ',';
    break;
end;
end;
end;
if length(str)>0 then
    ShowMessage('Симметрия нарушена в след. рамках: ' + str);
end;
procedure TForm1.btnContinueClick(Sender: TObject);
begin
    StopFlag := False;
    btnStop.Enabled := True; btnStart.Enabled := False;
    btnStep.Enabled := False;
    btnContinue.Enabled := False;
    while not StopFlag do
    begin
        Application.ProcessMessages;
        MoveVortexFrames;
        UpdateSystem;
        SolveSystem;
        CalculateAvgSpeed;
    end;
end;
procedure TForm1.CalculateAvgSpeed;
var i: Integer;
    v: T3dVector;
begin
    // Расчет средней скорости в точках
    if CalcAvgSpeed then
    begin
        for i := 0 to High(AvgSpeedPoints) do
        begin
            v := CountSpeed(AvgSpeedPoints[i]);
            AvgSpeeds[i].x := (AvgSpeedStep*AvgSpeeds[i].x + v.x)/(AvgSpeedStep+1);
            AvgSpeeds[i].y := (AvgSpeedStep*AvgSpeeds[i].y + v.y)/(AvgSpeedStep+1);
            AvgSpeeds[i].z := (AvgSpeedStep*AvgSpeeds[i].z + v.z)/(AvgSpeedStep+1);
        end;
    end;
    Inc(AvgSpeedStep);
end;
procedure TForm1.SolveSystem;
var
    n: Integer;
begin
    n := High(CalcPoints) + 1;
    SetLength(Gamma,n);
    SolveLinearSystem(n,Matr,Gamma);
end;
procedure TForm1.btnViewLeftClick(Sender: TObject);
begin
    GLCamera1.Position.X := GLCamera1.Position.X + 0.1;
    GLDummyCube1.Position.X := GLDummyCube1.Position.X + 0.1;
end;
procedure TForm1.btnViewRightClick(Sender: TObject);
begin
    GLCamera1.Position.X := GLCamera1.Position.X - 0.1;
    GLDummyCube1.Position.X := GLDummyCube1.Position.X - 0.1;
end;
procedure TForm1.btnViewUpClick(Sender: TObject);
begin
    GLCamera1.Position.Y := GLCamera1.Position.Y - 0.1;

```

```

GLDummyCube1.Position.Y := GLDummyCube1.Position.Y - 0.1;
end;
procedure TForm1.SpeedButton1Click(Sender: TObject);
begin
  GLCamera1.Position.Y := GLCamera1.Position.Y + 0.1;
  GLDummyCube1.Position.Y := GLDummyCube1.Position.Y + 0.1;
end;
procedure TForm1.SpeedButton3Click(Sender: TObject);
begin
  GLCamera1.SceneScale := GLCamera1.SceneScale / 1.1;
end;
procedure TForm1.SpeedButton4Click(Sender: TObject);
begin
  GLCamera1.SceneScale := GLCamera1.SceneScale * 1.1;
end;
procedure TForm1.UpdateSystem;
begin
  UpdateSystem1;
end;
// Обновление системы для случая, когда приточное отверстие представлено вихревыми рамками
procedure TForm1.UpdateSystem1;
var
  p, i, k, n: Integer;
  v: T3dVector;
begin
  n := High(CalcPoints) + 1;
  //SetLength(Matr,n,n+1);
  for p := 0 to n-1 do
  begin
    for k := 0 to n-1 do
    begin
      v.x := 0; v.y := 0; v.z := 0;
      for i := 0 to High(VortexFrames[k].Ribs) do
      v := VectorsAdd(v,funcG(VortexFrames[k].Ribs[i].a,VortexFrames[k].Ribs[i].b,CalcPoints[p].p));
      Matr[p,k] := ScalarProduct(v,CalcPoints[p].n);
      end;
      if p<TubeCalcPointCount then
      begin
        if HasInflowRing and (p>=InflowCalcPointMin) and (p<=InflowCalcPointMax) then
          Matr[p,n] := -InflowSpeed
        else
          Matr[p,n] := 0;
        end
      else
        Matr[p,n] := -Speed;
      for k := 0 to High(FreeVortexFrames) do
      begin
        v.x := 0; v.y := 0; v.z := 0;
        for i := 0 to High(FreeVortexFrames[k].Ribs) do
          v := VectorsAdd(v,funcG(FreeVortexFrames[k].Ribs[i].a,FreeVortexFrames[k].Ribs[i].b,CalcPoints[p].p));
          Matr[p,n] := Matr[p,n] - ScalarProduct(v,CalcPoints[p].n)*FreeVortexFrames[k].Gamma;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
procedure TForm1.VizualizeVortexFrame(f: TVortexFrame; glContainer: TGLBaseControl; color: TColorVector);
var
  j: Integer;
  lns: TGLLines;
begin
  lns := TGLLines.Create(self);
  for j := 0 to High(f.Ribs) do

```

```

begin
// Ins.AddNode(f.Ribs[j].a.x, f.Ribs[j].a.y, f.Ribs[j].a.z);
  Ins.AddNode(f.Ribs[j].b.x, f.Ribs[j].b.y, f.Ribs[j].b.z);
end;
// Ins.AddNode(f.Ribs[0].a.x, f.Ribs[0].a.y, f.Ribs[0].a.z);
Ins.AddNode(f.Ribs[0].b.x, f.Ribs[0].b.y, f.Ribs[0].b.z);
Ins.NodesAspect := InaCube;
Ins.NodeSize := 0.008;
Ins.LineColor.Initialize(color);
Ins.LineWidth := 3;
// GLScene1.Objects.AddChild(Ins);
glContainer.AddChild(Ins);
end;
procedure TForm1.btnSaveParamsClick(Sender: TObject);
var
  l, r, ro, s, h, r1, r2, si: Extended;
c1, c2: Integer;
fs: TFormatSettings;
begin
  l := 0;
  try
    l := StrToFloat(edTubeLength.Text);
  except
  end;
  if l <= 0 then
  begin
    ShowMessage('Длина трубы должна быть положительным числом!');
    Exit;
  end;
  r := 0;
  try
    r := StrToFloat(edTubeRadius.Text);
  except
  end;
  if r <= 0 then
  begin
    ShowMessage('Внутренний радиус трубы должен быть положительным числом!');
    Exit;
  end;
  ro := 0;
  try
    ro := StrToFloat(edTubeRadiusOuter.Text);
  except
  end;
  if ro <= 0 then
  begin
    ShowMessage('Внешний радиус трубы должен быть положительным числом!');
    Exit;
  end;
  if ro <= r then
  begin
    ShowMessage('Внешний радиус должен быть больше внутреннего!');
    Exit;
  end;
  s := 0;
  try
    s := StrToFloat(edSpeed.Text);
  except
  end;
  // if s <= 0 then
  // begin

```

```

// ShowMessage('Скорость приточного воздуха должна быть положительным числом!');
// Exit;
// end;
c1 := 0;
try
  c1 := StrToInt(edCircleCount.Text);
except
end;
if (c1 <= 0) or (c1 mod 2 <> 0) then
begin
  ShowMessage('Кол-во круговых рамок должно быть положительным четным числом!');
  Exit;
end;
c2 := 0;
try
  c2 := StrToInt(edCircleRibsCount.Text);
except
end;
if (c2 <= 0) or (c2 mod 2 <> 0) then
begin
  ShowMessage('Кол-во отрезков в рамке должно быть положительным четным числом!');
  Exit;
end;
h := 0;
try
  h := StrToFloat(edH.Text);
except
end;
if h <= 0 then
begin
  ShowMessage('Шаг дискретности должен быть положительным числом!');
  Exit;
end;
r1 := 0;
try
  r1 := StrToFloat(edInflowR1.Text);
except
end;
if r1 <= 0 then
begin
  ShowMessage('Внутренний радиус приточ. кольца должен быть положительным числом!');
  Exit;
end;
if (r1 <= r) or (r1 >= ro) then
begin
  ShowMessage('Слишком большой или слишком маленький внутренний радиус приточ. кольца!');
  Exit;
end;
r2 := 0;
try
  r2 := StrToFloat(edInflowR2.Text);
except
end;
if r2 <= 0 then
begin
  ShowMessage('Внешний радиус приточ. кольца должен быть положительным числом!');
  Exit;
end;
if (r2 <= r1) then
begin
  ShowMessage('Внешний радиус приточ. кольца должен быть больше внутреннего!');

```

```

    Exit;
end;
if (r1 <= r) or (r1 >= ro) then
begin
    ShowMessage('Слишком большой или слишком маленький внешний радиус приточ. кольца!');
    Exit;
end;
si := 0;
try
    si := StrToFloat(edInflowSpeed.Text);
except
end;
if si <= 0 then
begin
    ShowMessage('Скорость приточного воздуха должна быть положительным числом!');
    Exit;
end;
// Применяем параметры
TubeLength := l;
TubeRadius := r;
TubeRadiusOuter := ro;
Speed := s;
CircleCount := c1;
CircleNumPoints := c2;
DiscrStep := h;
HasInflowRing := cbHasInflow.Checked;
InflowRadiusInner := r1;
InflowRadiusOuter := r2;
InflowSpeed := si;
// Инициализируем дискретизацию и решаем систему уравнений
InitVortexes;
BuildSystem;
SolveSystem;
//MoveVortexFrames;
end;
procedure TForm1.btnStartClick(Sender: TObject);
begin
    ModelStep := 0;
    ModelTime := 0.0;
    AvgSpeedStep := 0;
    StopFlag := False;
btnStop.Enabled := True;
btnStart.Enabled := False;
    btnStop.Enabled := False;
    btnContinue.Enabled := False;
    SetLength(FreeVortexFrames,0);
    FreeVortexesRoot.DeleteChildren;
    BuildSystem;
    SolveSystem;
    while not StopFlag do
    begin
        Application.ProcessMessages;
        MoveVortexFrames;
        UpdateSystem;
        SolveSystem;
        CalculateAvgSpeed;
    end;
end;
procedure TForm1.btnStepClick(Sender: TObject);
begin
    MoveVortexFrames;

```

```

UpdateSystem;
SolveSystem;
CalculateAvgSpeed;
end;
procedure TForm1.btnStopClick(Sender: TObject);
begin
  StopFlag := True;
  btnStop.Enabled := False;
  btnStart.Enabled := True;
  btnStep.Enabled := True;
  btnContinue.Enabled := True;
end;
procedure TForm1.btnInflowPointsInfoClick(Sender: TObject);
var
  i, k: Integer;
  v: T3dVector;
  q: Extended;
begin
  Form2.Memo1.Lines.Clear;
  Form2.Memo1.Lines.Add('N | Координаты | Скорость в |');
  Form2.Memo1.Lines.Add(' | расчетной точки | расчетной точке |');
  Form2.Memo1.Lines.Add('---+-----+-----+');
  k := 1;
  for i := 0{CircleCount} to High(CalcPoints) do
  begin
    v := CountSpeed(CalcPoints[i].p);
    Form2.Memo1.Lines.Add(
      Format('%2d |(%7.4f, %7.4f, %7.4f)|(%7.4f, %7.4f, %7.4f)|',
        [k, CalcPoints[i].p.x, CalcPoints[i].p.y, CalcPoints[i].p.z, v.x, v.y, v.z])
    );
    Inc(k);
  end;
  Form2.Memo1.Lines.Add('---+-----+-----+');
  Form2.Memo1.Lines.Add('');
  Form2.Memo1.Lines.Add('-----+-----+-----+');
  end;
  Form2.Memo1.Lines.Add('Номер рамки | Координата | Интенсивность |');
  Form2.Memo1.Lines.Add(' | первой точки | |');
  Form2.Memo1.Lines.Add('-----+-----+-----+');
  for i := 0 to High(VortexFrames) do
  begin
    Form2.Memo1.Lines.Add(
      Format('%2d |(%7.4f, %7.4f, %7.4f)| %7.4f |',
        [i+1, VortexFrames[i].Ribs[0].a.x, VortexFrames[i].Ribs[0].a.y,
          VortexFrames[i].Ribs[0].a.z, Gamma[i]])
    );
  end;
  Form2.Memo1.Lines.Add('-----+-----+-----+');
  Form2.ShowModal;
  end;
procedure TForm1.btnCountSpeedClick(Sender: TObject);
var v: T3dVector;
    p: T3dPoint;
begin
  try
    SetPoint(p, StrToFloat(edSpeedX.Text), StrToFloat(edSpeedY.Text), StrToFloat(edSpeedZ.Text));
  //
  // showCountSpeedMsg := True;
  //
  v := CountSpeed(p);

```

```

//
// showCountSpeedMsg := False;
//
  ShowMessage('Скорость: Vx = ' + FloatToStrF(v.x,ffFixed,7,4) + ', Vy = ' +
    FloatToStrF(v.y,ffFixed,7,4) + ', Vz = ' + FloatToStrF(v.z,ffFixed,7,4));
except
  ShowMessage('Введите корректные координаты точки!');
end;
end;
procedure TForm1.CheckBox1Click(Sender: TObject);
begin
  DiscreteRoot.Visible:= CheckBox1.Checked;
end;
procedure TForm1.cbHasInflowClick(Sender: TObject);
begin
  edInflowSpeed.Enabled := cbHasInflow.Checked;
  edInflowR1.Enabled := cbHasInflow.Checked;
  edInflowR2.Enabled := cbHasInflow.Checked;
end;
procedure TForm1.cbShowFlowLinesClick(Sender: TObject);
begin
  FlowLinesRoot.Visible:= cbShowFlowLines.Checked;
end;
procedure TForm1.cbShowFreeFramesClick(Sender: TObject);
begin
  FreeVortexesRoot.Visible:= cbShowFreeFrames.Checked;
end;
procedure TForm1.cbShowTubeClick(Sender: TObject);
begin
  GLPipe1.Visible := cbShowTube.Checked;
  GLPipeOuter.Visible := cbShowTube.Checked;
  GLDiskOutside.Visible := cbShowTube.Checked;
  GLDiskInside.Visible := cbShowTube.Checked;
  GLDiskInflow.Visible := cbShowTube.Checked;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var i: Integer;
begin
  FormatSettings.DecimalSeparator := '.';
  InitVortexes;
  BuildSystem;
  SolveSystem;
  //MoveVortexFrames;
end;
procedure TForm1.GLSceneViewer1MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  RotateFlag := True;
  RotatePrevX := X;
  RotatePrevY := Y;
end;
procedure TForm1.GLSceneViewer1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin if (RotateFlag) then
begin
  if (RotatePrevX <> X) then
  begin
    GLBaseControl1.Turn((RotatePrevX-X)/4);
    RotatePrevX := X;
  end;
  RotatePrevY := Y;
end;
end;

```

```

end;
end;
procedure TForm1.GLSceneViewer1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  RotateFlag := False;
end;
procedure TForm1.imChooseDiscrStepClick(Sender: TObject);
var i, j: Integer;
begin
  frmDiscrStepInfo.edCircleRibLength.Text :=
    FloatToStrF(VectorModulus(RibToVector(VortexFrames[0].Ribs[0])), ffFixed, 8, 5);
  frmDiscrStepInfo.edCircleDistance.Text :=
    FloatToStrF(Abs(VortexFrames[0].Ribs[0].a.x - VortexFrames[1].Ribs[0].a.x), ffFixed, 8, 5);
  frmDiscrStepInfo.edMinCalcPointRibDistance.Text :=
    FloatToStrF(MinCalcPointRibDistance, ffFixed, 8, 5);
  frmDiscrStepInfo.ShowModal;
end;
end.

unit MathUtils;
interface
uses Dialogs;
type
  TFloatArray = array of Extended;
  TFloatMatr = array of TFloatArray;
  T2dPoint = record
    x, y: Extended;
  end;
  T2dPointArray = array of T2dPoint;
  T3dPoint = record
    x, y, z: Extended;
  end;
  T3dPointArray = array of T3dPoint;
  T3dVector = record
    x, y, z: Extended;
  end;
  T3dVectorArray = array of T3dVector;
type
  TRib = record
    a, b: T3dPoint;
  end;
  TVortexFrame = record
    Ribs: array of TRib;
    RibsCount: Integer;
    Gamma: Extended;
  end;
  TVortexFrameArray = array of TVortexFrame;
  TCalcPoint = record
    p: T3dPoint; // сама точка
    n: T3dVector; // нормаль
  end;
  TCalcPointArray = array of TCalcPoint;
  TCalcFrame = record // Невихревая рамка с расчетной точкой
    Ribs: array of TRib;
    s: Extended; // площадь рамки
    p: T3dPoint; // точка в центре рамки
    n: T3dVector; // нормаль
  end;
  TCalcFrameArray = array of TCalcFrame;
  TBreakVortexRib = record // Информация о ребре, с которого сходят вихревые рамки

```

```

a, b: T3dPoint; // Концы ребра
VortexFrameInd: Integer; // Индекс соответв. вихревой рамки (для определения текущей циркуляции)
end;
TBreakVortexRibArray = array of TBreakVortexRib;
// Решение системы линейных уравнений методом Гаусса
function SolveLinearSystem(n: Integer; Matr: TFloatMatr; var X: TFloatArray): SmallInt;
// Векторное произведение двух векторов
function CrossProduct(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
// Скалярное произведение двух векторов
function ScalarProduct(v1, v2: T3dVector): Extended;
// Модуль вектора
function VectorModulus(v: T3dVector): Extended;
// Модуль вектора в квадрате
function VectorModulus2(v: T3dVector): Extended;
// Сумма двух векторов
function VectorsAdd(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
function VectorsSub(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
// Умножение вектора на число
function ScaleVector(v: T3dVector; k: Extended): T3dVector;
procedure SetPoint(var p: T3dPoint; x, y, z: Extended);
procedure SetVector(var v: T3dVector; x, y, z: Extended);
function RibToVector(r: TRib): T3dVector;
// Площадь треугольника
function TriangleArea(A, B, C: T2dPoint): Extended;
// Площадь выпуклого многоугольника
function ConvexPoligonArea(Points: T2dPointArray): Extended;
function funcG(A,B,M: T3dPoint): T3dVector;
// Расстояние между двумя точками
function PointsDistance(A,B: T3dPoint): Extended;
// Расстояние между точкой P и вектором AB
function PointVectorDistance(P, A, B: T3dPoint): Extended;
// Решение квадратного уравнения
function SolveQuadricEquation(a, b, c: Extended; var x1, x2: Extended): Integer;
implementation
function SolveLinearSystem(n: Integer; Matr: TFloatMatr; var X: TFloatArray): SmallInt;
var
  i, j, k, maxR: Integer;
  max, h, s: Extended;
  tmpR: TFloatArray;
begin
  for i := 0 to n-1 do
  begin
    // Поиск максимального элемента в столбце
    maxR := i;
    max := Matr[i,i];
    for j := i+1 to n-1 do
    begin
      if abs(Matrx[j,i]) > abs(max) then
      begin
        max := Matr[j,i];
        maxR := j;
      end;
    end;
    // Проверка, разрешима ли система
    if abs(max) < 1e-10 then
    begin
      Result := -1;
      Exit;
    end;
    // Обмен строк местами
    if maxR <> i then

```

```

begin
  tmpR := Matr[i];
  Matr[i] := Matr[maxR];
  Matr[maxR] := tmpR;
end;
// Приведение системы к треугольному виду
for j := i+1 to n-1 do
  begin
    h := -Matr[j,i]/Matr[i,i];
    for k := i to n do (* i+1 *)
      Matr[j,k] := Matr[j,k] + Matr[i,k] * h;
    end;
  end;
// Получение результирующего вектора через обратный ход
for i := n-1 downto 0 do
  begin
    s := 0;
    for j := i+1 to n-1 do
      s := s + Matr[i,j] * X[j];
    X[i] := (Matr[i,n] - s) / Matr[i,i];
  end;
  Result := 0;
end;
function CrossProduct(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
begin
  Result.x := v1.y * v2.z - v1.z * v2.y;
  Result.y := v1.z * v2.x - v1.x * v2.z;
  Result.z := v1.x * v2.y - v1.y * v2.x;
end;
function ScalarProduct(v1, v2: T3dVector): Extended;
begin
  Result := v1.x * v2.x + v1.y * v2.y + v1.z * v2.z;
end;
function VectorModulus2(v: T3dVector): Extended;
begin
  Result := Sqr(v.x) + Sqr(v.y) + Sqr(v.z);
end;
function VectorModulus(v: T3dVector): Extended;
begin
  Result := Sqrt(VectorModulus2(v));
end;
function VectorsAdd(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
begin
  Result.x := v1.x + v2.x;
  Result.y := v1.y + v2.y;
  Result.z := v1.z + v2.z;
end;
function VectorsSub(v1, v2: T3dVector): T3dVector;
begin
  Result.x := v1.x - v2.x;
  Result.y := v1.y - v2.y;
  Result.z := v1.z - v2.z;
end;
function ScaleVector(v: T3dVector; k: Extended): T3dVector;
begin
  Result.x := v.x * k;
  Result.y := v.y * k;
  Result.z := v.z * k;
end;
procedure SetPoint(var p: T3dPoint; x, y, z: Extended);
begin

```

```

    p.x := x; p.y := y; p.z := z;
end;
procedure SetVector(var v: T3dVector; x, y, z: Extended);
begin
    v.x := x; v.y := y; v.z := z;
end;
function RibToVector(r: TRib): T3dVector;
begin
    Result.x := r.b.x - r.a.x;
    Result.y := r.b.y - r.a.y;
    Result.z := r.b.z - r.a.z;
end;
function TriangleArea(A, B, C: T2dPoint): Extended;
begin
    Result := abs((A.x-C.x)*(B.y-C.y)-(B.x-C.x)*(A.y-C.y))/2;
end;
function ConvexPoligonArea(Points: T2dPointArray):
    Extended;
    vari Integer;
begin
    Result := 0;
    for i := 2 to High(Points) do
        Result := Result + TriangleArea(Points[0], Points[i-1], Points[i]);
    end;
end;
function VectorFromPoints(a, b: T3dPoint): T3dVector;
begin
    Result.x := b.x - a.x;
    Result.y := b.y - a.y;
    Result.z := b.z - a.z;
end;
function funcG(A,B,M: T3dPoint): T3dVector;
var
    AB, AM, BM: T3dVector;
    x, s, mAB2, mAM2 : Extended;
//
// f: TextFile;
//
begin
    (*
    AB := VectorFromPoints(A,B);
    AM := VectorFromPoints(A,M);
    s := ScalarProduct(AB,AM);
    mAB2 := VectorModulus2(AB);
    mAM2 := VectorModulus2(AM);
    x := (1 + s / (Sqrt(mAB2) * Sqrt(mAM2))) / (4 * Pi) / (mAB2 * mAM2 - Sqr(s));
    Result := CrossProduct(AB,AM);
    Result.x := Result.x * x;
    Result.y := Result.y * x;
    Result.z := Result.z * x;
    *)
    AB := VectorFromPoints(A,B);
    AM := VectorFromPoints(A,M);
    BM := VectorFromPoints(B,M);
    Result := CrossProduct(AB,AM);
    // Если все три точки лежат на одной прямой, то возвращаем нулевой вектор
    if (abs(Result.x)<1e-10) and (abs(Result.y)<1e-10) and (abs(Result.z)<1e-10) then
        begin
//
// AssignFile(f,'funcg.log');
// Append(f);
// Write(f,'A: ',A.x:8:5,A.y:8:5,A.z:8:5);

```

```

// Write(f,'; B: ',B.x:8:5,B.y:8:5,B.z:8:5);
// WriteLn(f,'; M: ',M.x:8:5,M.y:8:5,M.z:8:5);
// CloseFile(f);
//
  SetVector(Result,0,0,0);
  Exit;
end;
s := ScalarProduct(AB,AM);
mAB2 := VectorModulus2(AB);
mAM2 := VectorModulus2(AM);
x := (-ScalarProduct(AB,BM) / VectorModulus(BM) + s / Sqrt(mAM2)) / (4 * Pi) / (mAB2 * mAM2 - Sqr(s));
Result.x := Result.x * x;
Result.y := Result.y * x;
Result.z := Result.z * x;
end;
function PointsDistance(A,B: T3dPoint): Extended;
begin
  Result:= VectorModulus(VectorFromPoints(A,B));
end;
function PointVectorDistance(P, A, B: T3dPoint): Extended;
var AP,AB: T3dVector;
begin
  SetVector(AB, B.x-A.x, B.y-A.y, B.z-A.z);
  SetVector(AP, P.x-A.x, P.y-A.y, P.z-A.z);
  Result := VectorModulus(CrossProduct(AB,AP)) / VectorModulus(AB);
end;
function SolveQuadricEquation(a, b, c: Extended; var x1, x2: Extended): Integer;
var D: Extended;
begin
  D := b*b - 4*a*c;
  if D<0 then
    Result := 0
  else
    begin
      if D<1e-10 then
        begin
          x1 := -b/(2*a);
          Result := 1;
        end
      else
        begin
          D := Sqrt(D);
          x1 := (-b + D)/(2*a);
          x2 := (-b - D)/(2*a);
          Result := 2;
        end
      end;
    end;
end;
end; end.

```

Приложение В – Таблицы поля скоростей вблизи местных отсосов

Таблица В.1

Поле скоростей вблизи круглой трубы

$x = 0.0$			$x = 2.0$			$x = 4.0$			$x = 6.0$		
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r
0	6.35	-	0	3.50	-	0.0	1.98	-	0.0	1.18	-
1	6.28	0.70	1	3.58	0.43	1.5	1.78	0.24	1.5	1.17	0.18
2	6.41	0.81	2	3.26	0.44	2.5	1.77	0.27	2.5	1.00	0.23
3	6.83	0.70	3	2.90	2.00	3.5	1.67	0.80	4.0	1.00	0.52
4	6.92	0.63	4	2.99	3.01	4.0	1.38	1.30	5.0	0.81	0.46
$x = 8.0$			5	1.27	2.05	5.0	1.25	1.30	6.0	0.77	0.70
0.0	0.76	-	$x = 10.0$			6.0	0.79	0.94	7.0	0.59	0.47
1.5	0.72	0.11	0.0	0.48	-	7.0	0.44	0.88	$x = 18.0$		
2.5	0.63	0.09	2.0	0.49	0.06	$x = 12.0$			0	0.16	
3.5	0.61	0.12	3.0	0.46	0.11	0.0	0.37		2	0.17	
5.0	0.56	0.16	4.0	0.46	0.08	1.0	0.35		3	0.18	
6.0	0.50	0.35	5.0	0.41	0.10	2.0	0.36		4	0.19	
7.0	0.43	0.25	6.0	0.42	0.16	3.5	0.36	0.06	5	0.17	
			7.0	0.39	0.25	4.5	0.33	0.07	6	0.16	
						5.25	0.32	0.17	7	0.19	
						6.5	0.30	0.17	9	0.13	
						7.0	0.31	0.17			

Примечание: работал один вентилятор 2 (рисунок 4.1). Атмосферное давление $P_a = 99\,700$ Па, $v_{\max} = 6,41$ м/с, $v_0 = 0,816v_{\max} = 5,23$ м/с. Размеры x и r в таблицах В.1-В.14 в сантиметрах, составляющие скорости в м/с.

Таблица В.2

Поле скоростей вблизи круглой трубы при $v_{\max} = 8,20$ м/с, $v_0 = 0,816v_{\max} = 6,69$ м/с (два вентилятора)

$x = 0.50$			$x = 3.50$			$x = 7.50$			$x = 11.0$			$x = 15.0$		$x = 19.0$	
r	v_x	v_r	r	v_x	r	v_x									
0	7.62	-	0	2.99	-	0	1.14	-	0	0.50	-	0	0.26	0	0.16
1	7.92	0.56	2	2.87	0.35	2	1.05	0.15	2	0.48	0.12	2	0.29	2	0.17
2	8.16	0.92	4	2.30	0.88	4	0.90	0.16	4	0.48	0.11	4	0.27	4	0.21
3	8.34	1.08	6	1.20	1.41	6	0.62	0.26	6	0.41	0.15	6	0.25	6	0.18
4	8.90	1.54	8	0.73	0.92	8	0.44	0.34	8	0.37	0.11	8	0.25	8	0.17
5	8.74	8.26	10	0.32	0.54	10	0.34	0.36	10	0.26	0.19	10	0.20	10	0.14
12			12	0.19	0.40	12	0.30	0.27	12	0.28	0.20	12	0.19	12	0.14
14			14			14	0.22	0.22	14	0.17	0.09	14	0.14	14	0.11
16			16			16	0.14	0.19	16	0.13	0.13	16	0.09	16	0.10

Таблица В.3

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 90^\circ$ и $d = 5R$

$x = 2.0$			$x = 4.0$			$x = 6.0$			$x = 10.0$			$x = 14.0$			$x = 18.0$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x
0.0	5.18	-	0.0	2.90	-	0.0	1.83	-	0.0	0.89	-	0.0	0.50	-	0.0	0.31
1.5	5.13	0.66	2.0	2.57	0.37	1.5	1.72	-	1.5	0.84	0.15	1.5	0.50	0.09	1.5	0.33
3.5	4.37	1.47	4.0	2.65	1.19	4.0	1.43	0.47	3.5	0.81	0.11	4.0	0.48	0.10	3.5	0.33
5.5	3.54	3.50	6.0	1.81	0.82	6.0	1.23	0.97	5.5	0.73	0.14	6.0	0.45	0.11	5.5	0.31
7.5	1.15	2.24	8.0	1.17	1.24	8.0	0.96	0.82	7.5	0.62	0.18	8.0	0.41	0.13	8.0	0.30
9.5	0.41	1.32	10.0	0.35	0.90	10.0	0.50	0.73	9.5	0.51	0.36	10.0	0.37	0.15	9.5	0.28
11.5	0.15	0.82	12.0	0.35	0.69	12.0	0.38	0.49	11.5	0.41	0.40	12.0	0.31	0.15	12.0	0.26
15.5	0.08	0.47	15.5	0.22	0.43	14.0	0.22	0.46	13.0	0.30	0.31	15.5	0.25	0.15	16.0	0.22
			19.5	0.12	0.26	19.0	0.12	0.27	15.0	0.26	0.28	20.0	0.18	0.13	20.0	0.19
									17.0	0.21	0.25					
									19.5	0.15	0.21					

Примечание: работали два вентилятора 1 и 2 (рисунок 4.1), $P_a = 100\,400$

$P_a, v_{\max} = 9,30$ м/с, $v_0 = 0,816v_{\max} = 7,59$ м/с.

Таблица В.4

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 60^\circ$ и $d = 5R$

$x = 2.0$			$x = 6.0$			$x = 10.0$			$x = 14.0$		$x = 18.0$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	r	v_x
0.0	0.67	-	0.0	0.48	-	0.0	0.35	-	0.0	-	0.0	0.2
2.5	0.67	0.13	2.5	0.48	0.08	2.5	0.35	0.11	2.5	0.27	4.5	0.2
4.5	0.65	0.09	4.5	0.46	0.08	4.5	0.35	0.14	4.5	0.26	8.5	0.2
6.5	0.64	0.09	6.5	0.45	0.09	6.5	0.34	0.06	6.5	0.26	12.5	0.17
8.5	0.54	0.13	8.5	0.43	0.09	8.5	0.33	0.10	10.0	0.24	16.0	0.16
10.5	0.50	0.21	10.5	0.37	0.14	10.5	0.31	0.08	14.5	0.21	20.0	0.13
12.5	0.46	0.25	12.5	0.36	0.16	12.5	0.29	0.10	18.5	0.18		
16.5	0.34	0.17	16.5	0.30	0.13	16.5	0.24	0.10	22.5	0.13		
20.5	0.25	0.19	20.5	0.25	0.18	20.5	0.18	0.13				

Примечание: работали два вентилятора 1 и 2 (рисунок 4.1), $P_a = 100\,000$ Па,

$v_{\max} = 9,29$ м/с, $v_0 = 0,816v_{\max} = 7,58$ м/с

Таблица В.5

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 30^\circ$ и $d = 5R$

$x = 1.50$			$x = 5.50$			$x = 9.50$			$x = 13.0$		$x = 18.0$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	r	v_x
0.0	0.70	-	0.0	0.50	-	0.0	0.37	-	0.0	0.28	0.0	0.17
2.0	0.71	0.15	4.0	0.49	0.11	4.0	0.37	0.07	4.0	0.26	3.5	0.20
4.0	0.72	0.18	8.0	0.49	0.08	8.0	0.37	0.09	8.0	0.26	7.5	0.19
6.0	0.70	0.10	12.0	0.45	0.12	12.0	0.34	0.13	11.0	0.27	11.5	0.17
8.0	0.69	0.14	16.0	0.33	0.28	16.0	0.27	0.20	15.0	0.22	15.5	0.13
10.0	0.68	0.14	18.0	0.27	0.20	18.0	0.19	0.11	19.0	0.15	19.5	0.09
12.0	0.65	0.14	20	0.16	0.30	20.0	0.16	0.14	23.0	0.13	21.5	0.09
14.0	0.62	0.17										
16.0	0.59	0.61										
18.0	0.30	0.63										

Примечание: работали два вентилятора 1 и 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 9,17$ м/с,
 $v_0 = 0,816v_{\max} = 7,48$ м/с.

Таблица В.6

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 90^\circ$ и $d = 3R$

$x = 0.0$			$x = 2.0$			$x = 2.0$			$x = 4.0$			$x = 6.0$			$x = 8.0$		
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r									
0	5.30	-	0	3.35	-	0	3.24	-	0	1.81	-	0	1.23	-	0	0.87	-
2	5.28	0.42	1	3.15	0.24	1	3.30	0.33	1	1.80	0.18	1	1.24	0.17	1.5	0.88	0,08
3	5.28	0.64	2	3.20	0.43	2	3.04	0.35	2	1.77	0.22	2.5	1.26	0.16	3	0.83	0,11
4	5.38	0.89	3	2.87	0.92	3	2.88	0.83	3	1.75	0.29	3.5	1.17	0.14	4	0.75	0,10
5	5.75	5.45	4	2.69	1.25	4	2.75	0.83	4	1.56	0.36	5	1.04	0.44	5	0.76	0,18
$x = 10.0$			6	1.62	2.02	5	2.26	2.57	5	1.37	0.55	6	0.92	0.35	6	0.69	0.25
r	v_x	v_r	$x = 12.0$			6	2.15	1.41	6	1.13	0.71	7	0.86	0.41	7	0.65	0.29
0	0.61	-	r	v_x	v_r	7	0.56	1.71	7	0.78	1.05	8	0.76	0.36	8	0.54	0,34
1.5	0.61	0.06	0	0.47	-	$x = 16.0$			8.5	0.59	0.92	8.5	0.67	0.35	9	0.47	0.39
2.5	0.63	0.06	1.5	0.46	0.05	r	v_x		10	0.38	0.76	10	0.56	0.57	10	0.42	0.41
3.5	0.59	0.07	2.5	0.50	0.05	0	0.31		11	0.32	0.62	10.5	0.49	0.48	11	0.37	0.36
4.5	0.55	0.09	3.5	0.43	0.05	2	0.30		12.5	0.17	0.52						
5.5	0.51	0.14	4.5	0.44	0.05	2.5	0.29		$x = 21.0$								
6.75	0.51	0.16	5.5	0.42	0.09	4	0.28		r	v_x							
7.75	0.46	0.29	6.5	0.40	0.10	5	0.29		0	0.20							
8.25	0.46	0.23	7.5	0.37	0.08	6	0.25		2	0.17							
9.5	0.39	0.32	8.5	0.35	0.16	7	0.26		4	0.17							
10.5	0.36	0.25	9.5	0.32	0.18	8	0.25		6	0.16							
11.5	0.28	0.24	10.5	0.31	0.15	10	0.23		9	0.15							
			11.5	0.26	0.19	12	0.21		14	0.11							
						15	0.15										

Примечание: работал
вентилятор 2 (рисунок 4.1).
 $P_a = 100\ 200$ Па, $v_{\max} = 6,29$
м/с, $v_0 = 5,13$ м/с

Таблица В.7

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 60^\circ$ и $d = 3R$

$x = 0.50$			$x = 1.50$			$x = 5.50$			$x = 9.50$			$x = 13.50$			$x = 17.50$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x									
0.0	0.99	-	0.0	0.85	-	0.0	0.52	-	0	0.34	-	0.0	0.25	-	0.0	0.18
1.5	0.96	0.10	1.5	0.81	0.09	1.5	0.51	0.05	2	0.34	0.04	1.5	0.26	0.04	1.5	0.18
2.5	0.97	0.10	2.5	0.78	0.19	2.5	0.50	0.05	3.5	0.35	0.05	3.5	0.25	0.06	3.5	0.18
4.5	0.87	0.18	4.5	0.73	0.08	4.5	0.46	0.06	5	0.34	0.05	5.5	0.24	0.07	5.5	0.17
6.5	0.76	0.40	6.5	0.63	0.15	6.5	0.45	0.09	7	0.32	0.06	7.5	0.21	0.06	7.5	0.18
8.5	0.63	0.49	8.5	0.53	0.37	8.5	0.41	0.11	9	0.27	0.05	9.5	0.20	0.08	10	0.15
10.5	0.54	0.50	10.5	0.49	0.46	10.5	0.34	0.21	11	0.27	0.06	12.0	0.20	0.08	12	0.15
12.5	0.47	0.42	12.5	0.38	0.37	12.5	0.32	0.24	13	0.23	0.12	14.0	0.17	0.06	14	0.12
14.5	0.33	0.40	14.5	0.32	0.36	14.5	0.27	0.25	15	0.18	0.12	16.0	0.16	0.06	16	0.10
16.5	0.25	0.38	16.5	0.14	0.39	16.5	0.20	0.26	16.5	0.17	0.12	18.5	0.10		18.5	0.10
18.5	0.09	0.24	18.5	0.06	0.38	18.5	0.15	0.22	18.5	0.11	0.14					

Примечание: работал вентилятор 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 6,30$ м/с, $v_0 = 5,14$ м/с.

Таблица В.8

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 30^\circ$ и $d = 3R$

$x = 0.50$			$x = 2.50$			$x = 6.50$			$x = 10.50$			$x = 14.50$		
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r
0.0	0.92	-	0.0	0.76	-	0.0	0.50	-	0.0	0.35	-	0.0	0.23	-
1.5	0.93	0.10	1.5	0.73	0.10	1.5	0.50	0.06	1.5	0.33	0.04	1.5	0.22	0.04
2.5	0.95	0.10	2.5	0.76	0.10	2.5	0.50	0.05	2.5	0.35	0.04	2.5	0.23	
3.5	0.91	0.13	4.5	0.72	0.08	4.5	0.47	0.05	4.5	0.39	0.09	4.5	0.22	0.03
4.5	0.89	0.13	6.5	0.71	0.11	6.5	0.46	0.09	6.5	0.32	0.07	6.5	0.23	0.05
5.5	0.91	0.13	8.5	0.69	0.21	8.5	0.43	0.18	8.5	0.28	0.11	8.5	0.16	
6.5	0.91	0.12	10.5	0.64	0.48	10.5	0.43	0.34	10.5	0.25	0.15	10.5	0.17	0.04
7.5	0.83	0.17	11.5	0.54	0.52	11.5	0.38	0.29	11.5	0.23	0.12	12.5	0.18	0.04
8.5	0.86	0.21	12.5	0.43	0.54	12.5	0.34	0.29	12.5	0.24	0.14	14.5	0.13	0.08
9.5	0.90	0.23	13.5	0.26	0.56	13.5	0.25	0.25	13.5	0.17	0.15			
10.5	0.89	0.43	14.5	0.07	0.51	14.5	0.20	0.23	14.5	0.21	0.14			
11.5	0.93	0.77												
12.5	0.77	0.99												
13.5	0.18	1.01												

Примечание: работал вентилятор 2 (рисунок 4.1). $v_{\max} = 6,22$ м/с,

$$v_0 = 0,816v_{\max} = 5,08 \text{ м/с}$$

Таблица В.9

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 90^\circ$ и $d = 2R$

$x = 0.50$			$x = 3.50$			$x = 7.50$			$x = 11.00$		
r	v_x	v_r									
0.0	7.61	-	0	2.99	-	0	1.28	-	0	0.66	-
1.5	7.71	0.54	2	2.89	0.31	2	1.27	0.16	2.5	0.68	0.19
2.5	7.92	0.97	4	2.59	0.37	4	1.20	0.15	4	0.67	0.10
3.5	7.89	1.03	6	1.98	1.58	6	1.00	0.15	6	0.62	0.14
4.5	8.60	7.99	8	1.23	1.36	8	0.79	0.33	8	0.52	0.19
6.0	0.97	6.99	10	0.51	0.93	10	0.61	0.43	10	0.46	0.25
			13	0.19	0.65	12	0.46	0.38	12	0.40	0.21
						14	0.33	0.33	14	0.31	0.17
$x = 15.00$			$x = 15.00$			16	0.27	0.29	16	0.21	0.19
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	$x = 18.00$			$x = 18.00$		
0	0.39		0	0.41		r	v_x	v_r	r	v_x	v_r
2	0.41	0.09	1.5	0.40		0.0	0.26		0.0	0.30	
4	0.40		3.5	0.40		2.5	0.31		2.5	0.30	
6	0.37		5.5	0.38		4.5	0.29	0.09	4.5	0.29	
8	0.36		7.5	0.35		6.0	0.28	0.07	6.5	0.31	
10	0.32		9.5	0.32		8.0	0.26		8.5	0.29	
12	0.26		12	0.27		10.0	0.25		10.5	0.26	
14	0.23		14	0.24		12.0	0.21		12.5	0.24	
16	0.19		16	0.21		14.0	0.18		14.5	0.19	
						16.0	0.15		16.5	0.18	

Примечание: $v_{\max} = 8,69$ м/с, $v_0 = 7,09$ м/с, $P_a = 99\,900$ Па.

Таблица В.10

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 60^\circ$ и $d = 2R$

$x = 0.50$			$x = 3.50$			$x = 7.50$			$x = 11.50$			$x = 15.00$		$x = 19.00$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	r	v_x
0	2.29	-	0	1.22	-	0	0.62	-	0	0.44	-	0	0.30	0	0.18
2	2.19	0.22	2	1.20	0.15	2	0.68	0.09	2	0.39	0.07	2	0.21	2	0.14
4	1.94	0.26	4	1.07	0.18	4	0.63	0.16	4	0.41	0.13	4	0.28	4	0.17
6	1.59	0.91	6	0.94	0.22	6	0.58	0.15	6	0.32	0.18	6	0.24	6	0.15
8	1.31	1.13	8	0.89	0.51	8	0.55	0.26	8	0.34	0.25	8	0.24	8	0.18
10	1.01	1.06	10	0.70	0.54	10	0.47	0.42	10	0.28	0.32	10	0.20	10	0.16
12	0.90	0.97	12	0.49	0.54	12	0.42	0.45	12	0.24	0.24	12	0.16	12	0.11
14	0.43	0.79	14	0.24	0.58	14	0.17	0.29	14	0.24	0.15	14	0.16	14	0.10
16	-0.75	0.67	16	0.11	0.47	16	0.09	0.31	16	0.12	0.22	16	0.17	16	0.09

Примечание: работал вентиляторы 1 и 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 8,81$ м/с,

$v_0 = 0,816v_{\max} = 7,19$ м/с.

Таблица В.11

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 30^\circ$ и $d = 2R$

$x = 0.50$			$x = 4.00$			$x = 8.00$			$x = 12.00$			$x = 16.00$		$x = 20.00$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	r	v_x
0	2.25	-	0	1.17	-	0	0.68	-	0	0.40	-	0	0.24	0	0.13
2	2.18	0.25	2	1.20	0.15	2	0.69	0.08	2	0.42	0.09	2	0.26	2	0.17
4	2.16	0.24	4	1.15	0.14	4	0.68	0.10	4	0.41	0.09	4	0.26	4	0.16
6	2.17	0.25	6	1.10	0.39	6	0.63	0.10	6	0.41	0.11	6	0.26	6	0.15
8	2.14	0.30	8	0.97	0.74	8	0.55	0.15	8	0.36	0.09	8	0.24	8	0.16
10	2.13	1.66	10	0.71	0.79	10	0.45	0.24	10	0.31	0.12	10	0.22	10	0.15
12	-1.14	2.35	12	0.33	0.58	12	0.37	0.19	12	0.27	0.18	12	0.21	12	0.15
14			14			14	0.26	0.29	14	0.21	0.19	14	0.19	14	0.13
16			16			16	0.23	0.22	16	0.21	0.19	16	0.18	16	0.12

Примечание: работали вентиляторы 1 и 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 8,61$ м/с,
 $v_0 = 0,816v_{\max} = 7,08$ м/с.

Таблица В.12

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 90^\circ$ и $d = R$

$x = 0.50$			$x = 3.00$			$x = 5.00$			$x = 7.00$		
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r
0.0	7.45	-	0	3.87	-	0	2.39	-	0	1.47	-
1.0	7.47	0.61	2	4.02	0.45	2	2.32	0.29	2	1.35	0.22
2.0	7.66	0.66	3.5	3.32	0.89	4	2.03	0.44	4	1.23	0.37
2.5	7.70	0.76	5.5	2.13	2.47	6	1.47	1.02	6	0.94	0.37
3.5	8.01	6.78	7.5	0.63	1.70	8	0.84	1.04	8	0.57	0.76
4.5	8.13	7.78	9.5	0.17	1.12	10	0.26	0.82	10	0.47	0.56
6.0	0.57	4.74	11.5	0.20	0.70	12	0.24	0.57	12	0.21	0.47
8.0	0.36	2.18									
$x = 11$ см			$x = 15$ см			$x = 18$ см					
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x				
0	0.74	-	0	0.40	-						
2	0.75	0.12	2	0.41	0.13	0.0	0.23				
4	0.70	0.12	4	0.44	0.08	2	0.28				
6	0.56	0.13	6	0.36	0.09	4	0.27				
8	0.50	0.14	8	0.36	0.11	6	0.28				
10	0.37	0.16	10	0.30	0.09	8	0.25				
12	0.36	0.26	12	0.22	0.17	10	0.23				
14			14			12	0.20				

Работали два вентилятора 1 и 2 (рисунок 4.1), $P_a = 99\,700$ Па, $v_{\max} = 9,17$ м/с,
 $v_0 = 7,48$ м/с.

Таблица В.13

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 60^\circ$ и $d = R$

$x = 0.50$			$x = 2.00$			$x = 6.00$			$x = 10.00$			$x = 14.00$			$x = 18.00$	
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	r	v_x
0	3.96	-	0	2.70	-	0	1.27	-	0	0.67	-	0	0.40	-	0	0.26
2	3.91	0.47	2	2.76	0.28	2	1.21	0.17	2	0.64	0.09	2	0.39	0.07	2	0.27
4	3.67	1.67	4	2.41	0.56	4	1.17	0.27	4	0.60	0.11	4	0.41	0.07	4	0.27
6	2.93	2.52	6	1.98	1.47	6	0.94	0.41	6	0.52	0.07	6	0.36	0.08	6	0.20
8	1.96	2.35	8	1.27	1.74	8	0.70	0.41	8	0.46	0.24	8	0.34	0.12	8	0.23
10	-0.26	1.97	10	0.22	1.44	10	0.34	0.64	10	0.41	0.36	10	0.30	0.09	10	0.20
12			12			12	0.22	0.52	12	0.33	0.32	12	0.27	0.15	12	0.16

Примечание: Работали вентиляторы 1 и 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 9,20$ м/с, $v_0 = 7,51$ м/с.

Таблица В.14

Поле скоростей вблизи отсоса – раструба с углом $\beta = 30^\circ$ и $d = R$

$x = 0.50$			$x = 1.50$			$x = 4.50$			$x = 8.50$		
r	v_x	v_r									
0	4.08	-	0	3.12	-	0	1.53	-	0	0.86	-
1.5	3.81	0.47	2.5	2.96	0.33	2	1.50	0.21	2	0.75	0.13
4	3.91	0.48	5	2.87	1.35	4	1.48	0.33	4	0.72	0.16
6	4.08	3.49	7	1.37	2.67	6	1.14	0.95	6	0.61	0.22
8	-1.38	4.50	8			8	0.81	0.88	8	0.50	0.31
$x = 10.50$			$x = 14.50$			10	0.39	0.69	10	0.33	0.31
r	v_x	v_r	r	v_x	v_r	12	0.21	0.43	12	0.22	0.33
0	0.56	-	0	0.35	-	$x = 18.50$			$x = 18.50$		
2	0.53	0.07	2	0.36	0.07	r	v_x		r	v_x	
4	0.56	0.20	4	0.33	0.07	0	0.21		10	0.19	
6	0.46	0.14	6	0.30	0.12	2	0.24		12	0.13	
8	0.39	0.26	8	0.28	0.11	4	0.24				
10	0.26	0.26	10	0.22	0.09	6	0.21				
12	0.25	0.24	12	0.18	0.15	8	0.20				

Примечание: работали вентиляторы 1 и 2 (рисунок 4.1), $v_{\max} = 9,17$ м/с, $v_0 = 7,48$ м/с.

Таблица В.15

**Анализ связи экспериментальных и расчётных величин поля скоростей
воздушного течения вблизи отсоса - раструба**

β	d	v	N	$r \pm dr$	t	F
0°	-	v_x	55	0,996±0,001	1.374	1,967
0°	-	v_r	38	0,650±0,094	2.21	3,118
0°	-	v_x	49	0,964±0,001	0.322	1,217
0°	-	v_r	27	0,894±0,04	0.649	1,071
90°	5R	v_x	55	0,991±0,002	0.29	1,28
90°	5R	v_r	40	0,966±0,011	0.276	1,337
60°	5R	v_x	41	0,996±0,001	1.178	1,048
60°	5R	v_r	24	0,732±0,09	1.307	2,237
30°	5R	v_x	38	0,99±0,003	0.269	1,271
30°	5R	v_r	21	0,852±0,006	1.435	1,455
90°	3R	v_x	88	0,989±0,002	0.53	1,324
90°	3R	v_r	64	0,849±0,035	3.547	1,386
60°	3R	v_x	64	0,991±0,002	0.039	1,325
60°	3R	v_r	48	0,885±0,031	0.826	1,047
30°	3R	v_x	56	0,981±0,005	0.142	1,535
30°	3R	v_r	49	0,945±0,015	1.514	1,669
90°	2R	v_x	49	0,982±0,005	0.739	2,126
90°	2R	v_r	27	0,873±0,046	0.28	3,26
60°	2R	v_x	54	0,988±0,003	0.187	1,024
60°	2R	v_r	32	0,772±0,071	0.208	1,024
30°	2R	v_x	50	0,974±0,007	0.200	1,093
30°	2R	v_r	28	0,67±0,105	0.851	1,031
90°	R	v_x	50	0,982±0,005	0.588	1,883
90°	R	v_r	37	0,736±0,075	0.485	2,873
60°	R	v_x	40	0,996±0,001	0.009	1,050
60°	R	v_r	28	0,915±0,03	0.487	1,192
30°	R	v_x	44	0,973±0,008	0.248	1,050
30°	R	v_r	40	0,966±0,012	0.296	1,080

Таблица В.16

**Анализ связи экспериментальных и расчётных размеров отрывной области
на входе в отсос - раструб**

Размеры области	N	$r \pm dr$	t	F
b	12	0,89 ±0,06	0,98	1,64
a_0	12	0,96 ±0,02	0,99	1,89
l	12	0,82 ±0,097	0,396	1,06
a	12	0,90 ±0,056	0,798	2,125
Ve	10	0,96 ±0,025	0,282	1,391

Приложение Г – документы о внедрении результатов диссертационного исследования



ООО «Дом и Ко», адрес: 308012 г. Белгород, пер. Харьковский, д. 36д, 5 этаж, тел. (4722) 24-00-40,
ИНН/КПП 3123091451/312301001, e-mail: dom.i.k@mail.ru
Банк: ОТДЕЛЕНИЕ №8592 СБЕРБАНКА РОССИИ Г.БЕЛГОРОД, адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 63
ИНН/ КПП 7707083893/312302001; Код ОКПО: 09803404; БИК: 041403633;
Расч. счет № 40702810007000000447; Кор.счет: 30101810100000000633; Код ОГРН: 1027700132195

Исх. № 51 от 24.11.2017 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

Логачева Артура Константиновича

Результаты научных исследований аспиранта Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова Логачева Артура Константиновича приняты к внедрению для проектирования систем локализации и улавливания загрязняющих веществ в помещении утилизации медицинских отходов в стоматологической поликлиниках г. Белгорода.

Разработанные Логачевым А.К. компьютерные программы и научно-обоснованные рекомендации дают возможность:

- снизить коэффициент местного сопротивления на входе во всасывающие каналы;
- улучшить акустические свойства местных вентиляционных отсосов, снизить их шумность при высоких скоростях всасывания;
- повысить эффективность улавливания загрязняющих веществ в местах их образования;
- снизить энергоёмкость систем местной вытяжной вентиляции.



Непокрытых Андрей Витальевич, директор ООО "Дом и Ко"
(фамилия, имя, отчество подписавшего, должность)



ООО «Институт «БелАгроПроект+»

Юридический адрес: 308036, г. Белгород, ул. Щорса, 45
 Почтовый адрес: 308036, г. Белгород, ул. Щорса, 45
 Тел.: 8(4722) 53-73-65 Email: belagroproekt@bk.ru
 Р/с 40702810207000011443 Отделение №8592 Сбербанка России г. Белгород
 ОГРН 1133123010240 ИНН 3123324949 КПП 312301001
 К/С 3010181010000000633 БИК 041403633

Справка об использовании результатов научно-исследовательской работы Логачева Артура Константиновича

Результаты научно-исследовательской работы на тему «Совершенствование методов расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа» аспиранта кафедры теплогазоснабжения и вентиляции федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» Логачева Артура Константиновича рекомендованы для проектирования местной вытяжной вентиляции от открытых источников пылевыведений и загрязняющих веществ.

Разработанные Логачевым А.К. методы расчета, их программно-алгоритмическая реализация, позволяет проектировщику:

- а) определить наиболее рациональное место размещение местного вентиляционного отсоса;
- б) определить режимно - конструктивные характеристики местного вентиляционного отсоса;
- в) вычислить необходимую производительность системы местной вытяжной вентиляции;
- г) разработать воздушно - струйное устройство для эффективной локализации пылегазовых выбросов, выбрать наиболее оптимальное соотношение всасываемого воздушного потока и приточного воздуха, активирующего местный отсос;
- д) выбрать наиболее рациональные геометрические размеры местного отсоса, эффективно улавливающего загрязняющие вещества.

Указанные возможности позволят проектировать новые системы местной вытяжной вентиляции сниженной энергоемкости и модернизировать существующие.

Генеральный директор
 ООО «Институт БелАгроПроект+»



Н.В. Крылов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение
 высшего образования
**«Белгородский государственный
 технологический университет
 им. В.Г. Шухова»**
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Костюкова ул., д. 46, г. Белгород, 308012.
 Тел. (4722) 54-20-87, факс (4722) 55-71-39.
 E-mail: rector@intbel.ru, <http://www.bstu.ru>

" ____ " ____ 20 ____ № ____
 На № ____ от ____

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,

[Signature] н., профессор

[Signature] И. Глаголев

2017г.



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования

Разработанные в ходе выполнения Логачевым Артуром Константиновичем диссертационного исследования на тему «Совершенствование методов расчета местных вентиляционных отсосов открытого типа» компьютерные программы: «Расчет отрывного пылегазового течения на входе в круглый патрубок в условиях внешнего набегающего потока», «Моделирование течения в спектре приточно-вытяжного устройства» внедрены в учебный процесс магистрантов, по направлению «Строительство», образовательной программе «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» БГТУ им. В.Г. Шухова, для проведения лабораторных занятий по курсам «Аэродинамика вентиляции и механика аэрозолей».

Научный руководитель, д.т.н.,
 профессор

[Signature]

О.А. Аверкова

Директор инженерно-
 строительного института,
 зав. кафедрой теплогазоснабжения
 и вентиляции, д.т.н., профессор

[Signature]

В.А. Уваров