

На правах рукописи

ХОДАКОВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

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

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Аверкова Ольга Александровна

Официальные оппоненты: **Посохин Владимир Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
советник ректората;

Кучеренко Мария Николаевна
канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Тольяттинский государственный
университет», заведующий кафедрой
«Теплогасоснабжение, вентиляция,
водоснабжение и водоотведение»

Ведущая организация **ФГБОУ ВПО «Волгоградский
государственный архитектурно-
строительный университет»**

Защита диссертации состоится «27» июня 2016 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Пухкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Актуальность данного направления исследований подтверждается грантами, в рамках которых они выполнялись: гранта Президента Российской Федерации НШ-588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газопылеулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий» (2012 - 2013); гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 12-08-97500-р_центр_а «Разработка методов и алгоритмов компьютерного моделирования, численное и экспериментальное исследование отрывных течений в энергосберегающих системах улавливания загрязняющих веществ» (2012 - 2014); программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова по проекту № А-10/12 «Разработка энергосберегающих систем локализации пылегазовых выделений при производстве строительных материалов» (2012 - 2014); гранта Президента Российской Федерации МК-103.2014.1 «Разработка методов и алгоритмов математического моделирования, численное и экспериментальное исследование двухфазных потоков в системах аспирации» (2014 - 2015).

Степень разработанности темы исследования. В основе теоретического и экспериментального изучения отрывных и вихревых течений лежат труды таких ученых, как Л.В. Гогиш, Г.Ю. Степанов, М.И. Гуревич, I. Paraschivoiu,

Н.Ф. Краснов, В.Н. Азаров, О.Г. Гоман, В.И. Карплюк, М.И. Ништ, С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский, А.И. Желанников.

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

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

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

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

Задачи исследования:

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

вытяжных каналов, позволяющую с достаточной точностью определять поле скоростей, границы отрыва потока и к.м.с. на входе во всасывающее отверстие, моделировать нестационарные течения, исследовать вихревые течения в застойных областях и определять пульсации скорости.

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

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Разработаны математические модели отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы, в спектре действия которых могут находиться механические экраны с выступами, позволяющие установить связь между коэффициентом сжатия струи и коэффициентом местного сопротивления;

2. Получена аналитическая зависимость связи коэффициента местного сопротивления и коэффициента сжатия струи для круглого всасывающего канала, экранированного экраном с выступом;

3. Выявлены зависимости изменения коэффициента местного сопротивления от геометрических размеров механических экранов, их формы, расположения и удаленности от всасывающих щелевидных каналов – неплотностей местных вентиляционных отсосов закрытого типа - укрытий;

4. Разработана математическая модель отрыва потока на входе во всасывающие каналы, использующая многоугольные вихревые рамки;

5. Впервые решена задача об отрыве потока на входе в квадратный всасывающий канал с острыми кромками, расположенный в неограниченном пространстве, с использованием разработанной компьютерной программы ;

6. Получена аналитическая зависимость для определения поверхности отрыва на входе в квадратный всасывающий канал.

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

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработаны способы снижения расхода отсасываемого воздуха местными вентиляционными отсосами, необходимого для эффективной локализации выбросов загрязняющих веществ.

– разработана программно-алгоритмическая поддержка для исследования отрыва потока на входе в щелевидные, круглые и квадратные всасывающие каналы.

– результаты исследований используются в учебном процессе при обучении студентов по направлению "Строительство" в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова.

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

Реализация результатов работы:

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

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

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

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены данные о реализации полученных результатов.

В первой главе диссертации приведен обзор методов расчета отрывных течений на входе во всасывающие каналы и способов снижения расхода воздуха, поступающего через неплотности аспирационных систем.

Во второй главе осуществлена разработка вычислительного алгоритма на основе использования стационарных дискретных вихрей. На примере задачи об истечении идеальной несжимаемой жидкости из дна резервуара установлена адекватность разрабатываемых алгоритмов на основе сравнения результатов расчета методом конформных отображений и на основе стационарных дискретных вихрей.

При помощи разработанной компьютерной программы исследовалось течение на входе в круглый всасывающий канал, в спектре действия которого находится тонкий кольцевой экран, снабженный выступом. Определены геометрические размеры и удаление кольцевого экрана с выступом от соосно расположенного круглого вытяжного канала, способствующих наибольшему аэродинамическому сопротивлению входа среды в этот канал. Предложена формула связи между к.м.с. всасывающего круглого патрубка и коэффициентом сжатия струи.

Сравнение результатов расчетных значений к.м.с. и проведенного натурального эксперимента, выполненного на опытно-промышленной установке, показывают достоверность произведенных расчетов.

В третьей главе приведены результаты экспериментального изучения отрывных течений на входе во всасывающие щелевидные каналы и способы снижения расхода воздуха, поступающего через щелевидные неплотности местных вентиляционных отсосов закрытого типа - укрытий.

Экспериментально исследовалось влияние механических экранов в виде козырька, пластины и прямого двугранного уголка на к.м.с. щелевидной неплотности укрытия. Были определены параметры механического экрана в виде прямого двугранного уголка, способствующие наибольшему увеличению к.м.с. щелевой неплотности. При помощи шлирен-метода были получены снимки эффекта срыва потока воздуха с края козырька.

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

В четвертой главе решены задачи моделирования отрывного течения при входе в круглый тонкостенный всасывающий патрубок и моделирования отрыва потока при входе в квадратное тонкостенное всасывающее отверстие в неограниченном пространстве.

Для расчета отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал использовалась осесимметричная стационарная и нестационарная постановки задачи, а также квазисимметричная, где использовались вихревые многоугольные рамки, что усложняет расчеты, но дает возможность решать трехмерные задачи.

Для проверки адекватности и достоверности рассмотренных моделей был произведен расчет осевой скорости в зависимости от расстояния до входа во всасывающее отверстие

При помощи разработанной компьютерной программы впервые решена задача математического моделирования отрывного воздушного течения при входе в квадратное тонкостенное всасывающее отверстие, расположенное в неограниченном пространстве, с использованием квадратных вихревых рамок.

В конце главы приводится описание разработанных компьютерных программ и их возможностей.

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

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны математические модели отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы, в спектре действия которых могут находиться механические экраны с выступами, позволяющие установить связь между коэффициентом сжатия струи и коэффициентом местного сопротивления.

Математическая модель и вычислительный алгоритм для расчета отрывного течения потока при входе в щелевидные и круглые всасывающие отверстия строились на основе стационарных дискретных вихрей. Их адекватность для щелевидных всасывающих каналов установлена путем решения модельной (тестовой) задачи об истечении идеальной несжимаемой жидкости из дна резервуара, решенной методом конформных отображений (методом Н.Е. Жуковского) и на основе стационарных дискретных прямолинейных вихрей.

Для круглых всасывающих каналов математическая модель и вычислительный алгоритм на основе стационарных вихревых колец строились следующим образом. Рассматривалась область течения на входе в круглый всасывающий канал, в спектре действия которого находится тонкий кольцевой экран, снабженный выступом (рисунок 1 а). С острых кромок A , B , C происходит срыв потока и образуются свободные поверхности тока. Необходимо определить их положение, скорость потока в любой заданной точке и к.м.с. при входе во всасывающее отверстие. Математическая постановка задачи: решить уравнение Лапласа для потенциала φ : $\Delta\varphi = 0$, при известных значениях нормальной составляющей скорости на границе $\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = v_n(x) - U_n$, где $x \in S$. Величина U_n учитывает влияние свободных вихрей, расположенных на свободных поверхностях тока, положение которых заранее неизвестно.

Данное уравнение преобразуется к граничному интегральному уравнению: $\int_S G(x, \xi) \omega(\xi) ds(\xi) = v_n(x) - \mu \int_\sigma G(x, \xi) ds(\xi)$, где $\omega(\xi)$ – интенсивность граничного вихревого слоя; $\mu = const$ – интенсивность свободного вихревого слоя на поверхности σ , образованного в результате отрыва потока с острой кромки; ξ – граничная точка. Функция $G(x, \xi)$ – это проекция величины скорости в точке $x(x_1, x_2)$ на направления вектора $n = \{n_1, n_2\}$, индуцированной единичным вихрем в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$.

В случае осевой симметрии:

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

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

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

Вихревой слой на граничной поверхности моделируется тонкими вихревыми кольцами с циркуляцией $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$ (рисунок 1 б). Вихри лежащие на острых кромках A, B, C считаются свободными. Посередине между граничными вихрями находились контрольные точки. Вводились следующие обозначения: $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка размещения k -го граничного вихря; $x^p(x_1, x_2)$ – координаты p -й контрольной точки. Проекция скорости в точке x^p на направление \mathbf{n} , индуцированная вихрем $\Gamma(\xi^k)$ в точке ξ^k , определяется из выражения $v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k)$.

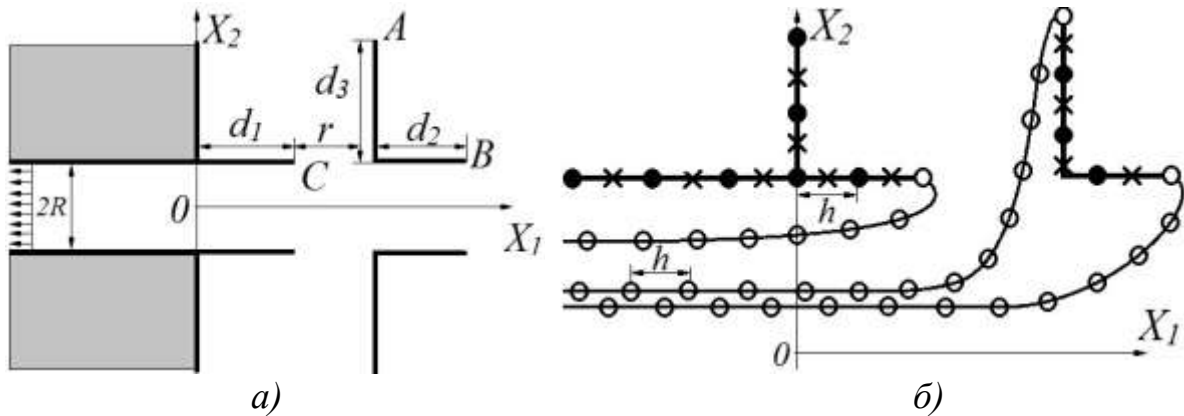


Рисунок 1 – Область отрывного течения: а) граница области; б) дискретизация границы области

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

Для свободных поверхностей тока, сходящих с кромок A и B , начального приближения не задавалось. Циркуляции на этих линиях тока заранее неизвестны, но они равны по абсолютной величине и противоположны по знаку, поскольку вращение частиц жидкости, сорвавшихся с этих кромок, осуществляется в противоположных направлениях.

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

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

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

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

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

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

На первой итерации, после определения неизвестных циркуляций вихрей, строятся все три поверхности тока, стекающие с острых кромок. После того как они удалятся от всасывающего проема трубы на расстояние больше 10 калибров, их построение прекращается. При построении поверхностей тока шаг во времени Δt выбирается достаточно малым. Построение поверхности тока начинается с острой кромки. Свободные кольцевые вихри располагают по этой поверхности так, что расстояние между ними равно величине h .

После определения второго приближения для свободных поверхностей тока необходимо снова решить систему уравнений (1) и определить циркуляции присоединенных вихрей. Затем строится третье приближение свободных поверхностей тока и т.д.

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

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

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

С использованием разработанной компьютерной программы решена задача о моделировании отрывного воздушного течения при входе в круглое тонкостенное всасывающее отверстие с кольцевым механическим экраном, снабженное выступом с целью определения геометрических размеров и удаления кольцевого экрана с выступом от соосно расположенного круглого вытяжного отверстия, способствующих наибольшему аэродинамическому сопротивлению входа среды в этот канал.

Из расчетов линий тока (рисунок 2) видно, что снабжение кольцевого экрана выступом значительно изменяет структуру течения. Отрывная зона на входе в трубу расширяется, образуется дополнительная область отрыва потока под выступом.

2. Получена аналитическая зависимость связи коэффициента местного сопротивления и коэффициента сжатия струи для круглого всасывающего канала, экранированного экраном с выступом.

Предложена следующая формула связи между к.м.с. ζ всасывающего круглого патрубка и коэффициентом сжатия струи δ :

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

расчеты по которой дают приемлемые для практики результаты (рисунок 3).

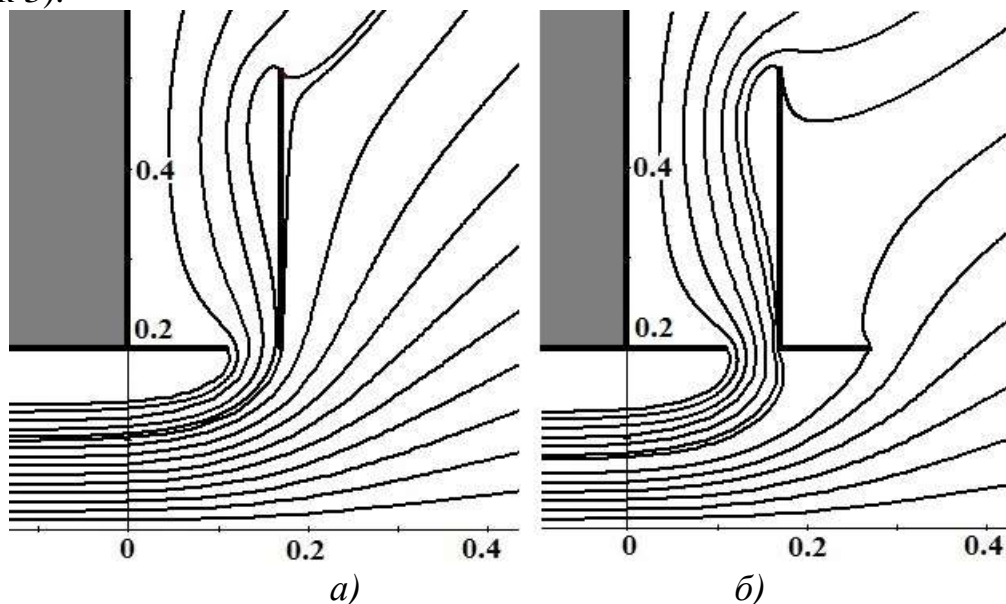


Рисунок 2 – Линии тока при обтекании тонкого экрана с центральным круглым отверстием при $d_1 = 0.5R$; $d_3 = 1.55R$; $R = 0.2\text{м}$; $r = 0.3R$; а) без выступа; б) с выступом $d_2 = 0.59R$

Как видно из данных, представленных на рисунке 3, снабжение кольцевого экрана выступом заметно повышает аэродинамическое сопротивление всасывающего канала. Максимальное значение к.м.с. $\zeta_m \approx 1.317$ достигается при коэффициенте сжатия струи $\delta/B = \delta_m \approx 0,608$, что следует из анализа функции (2) с помощью дифференциального исчисления.

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

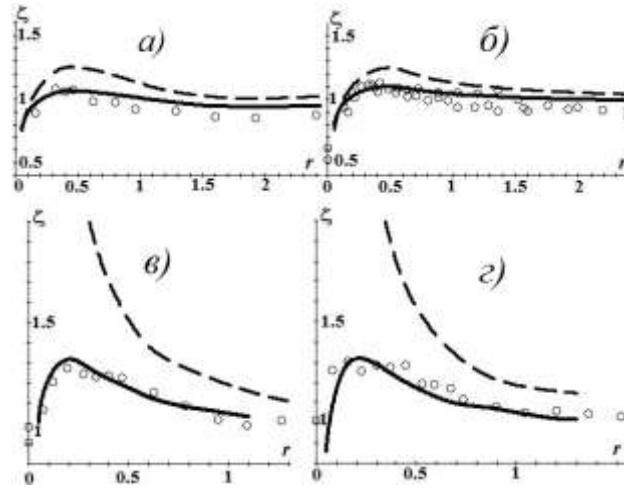


Рисунок 3 – Сравнение расчетных и экспериментальных величин к.м.с. ζ при удалении экрана от всасывающего проема (пунктирная линия – это расчет с использованием формулы И.Е. Идельчика; сплошная линия - по формуле (2); кружочки - данные эксперимента, полученные нами на экспериментальной установке): а) $d_1 = 0.5R$; $d_3 = 1.55R$; б) $d_1 = 0.55R$; $d_3 = 1.55R$; в) $d_1 = 0.5R$; $d_2 = 0.59R$ $d_3 = 1.55R$; г) $d_1 = 0.5R$; $d_2 = 0.96R$ $d_3 = 1.55R$

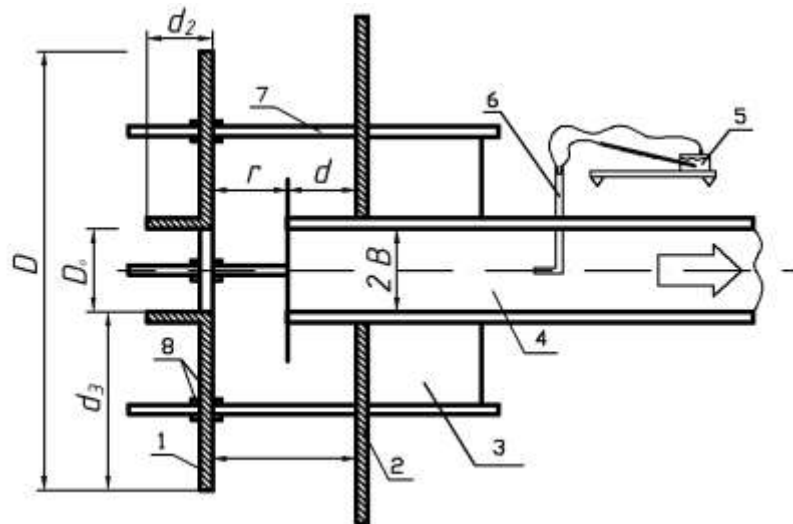


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки для определения сопротивления при входе воздуха в экранированное круглое отверстие: 1 – экран с центральным отверстием и выступом; 2 – щит; 3 – направляющая трехгранная призма; 4 – труба; 5 – микроманометр с наклонной трубкой; 6 – пневмометрическая трубка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

Сравнение результатов расчетных значений к.м.с. (рисунок 3) и натурального эксперимента, выполненного на лабораторной установке (рисунок 4) показывают достоверность расчетов по формуле (2). Экспериментальное значение к.м.с. на вход воздуха в воздуховод определялось из соотношения $\zeta = 2\Delta P / (\rho u^2)$. Средняя скорость u воздушного течения в трубе определялась при помощи замеров скоростного осевого давления и использования поправочного коэффициента, учитывающего неравномерность поля скоростей. Средняя скорость воздуха в трубе составляла 7 – 9 м/с.

3. Выявлены зависимости изменения коэффициента местного сопротивления от геометрических размеров механических экранов, их формы, расположения и удаленности от всасывающих щелевидных каналов – неплотностей местных вентиляционных отсосов закрытого типа – укрытий.

Для экспериментального выявления влияния на к.м.с. механических экранов разработана полупромышленная установка – укрытие (рисунок 5), представляющее собой короб с подведенным к нему вытяжным устройством. С торца короба находится неплотность с фиксированной высотой. Для определения давлений внутри использовались два штуцера: для замера статического давления внутри укрытия и для определения статического и динамического давлений в трубе вытяжного устройства. Стенки укрытия изготовлены из прозрачного материала.

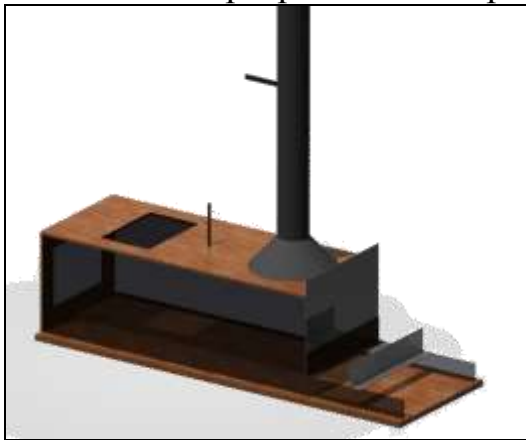


Рисунок 5 – Модель укрытия

Экспериментально исследовалось влияние механических экранов в виде козырька (рисунок 6), пластины (рисунок 7) и прямого двугранного уголка (рисунок 8) на к.м.с. неплотности аспирационного укрытия. Были определены параметры механического экрана в виде прямого двугранного уголка (рисунок 9), способствующие наибольшему увеличению к.м.с. щелевой неплотности.

При помощи шлирен-метода были получены снимки эффекта срыва потока воздуха с края козырька (рисунок 10).

Для оценки эффективности того или иного приспособления, влияющего на поле скоростей при входе в укрытие использовался к.м.с. Коэффициент местного сопротивления ζ , приведенный к скорости потока w_1 в сечении неплотности аспирационного укрытия (F_1) рассчитывался при помощи формулы: $\zeta_1 = F_1^2 (P_{атм} - P_{укр}) / (F_0^2 P_{\partial_0})$, скорость в том же сечении $w_1 = F_0 \sqrt{2P_{\partial_0} / \rho} / F_1$, где $P_{атм}$ - атмосферное давление, Па; $P_{укр}$ - полное статическое давление в укрытии, Па; P_{∂_0} - динамический напор потока воздуха

в сечении трубы, Па, F_0 - площадь воздушного течения в сечении трубы, м²; F_1 - площадь воздушного течения в сечении неплотности, м², w_0 - скорость воздушного потока в сечении трубы, м/с, ρ - плотность воздуха, кг/м³; $t_{изм}$, °С – температура воздуха.

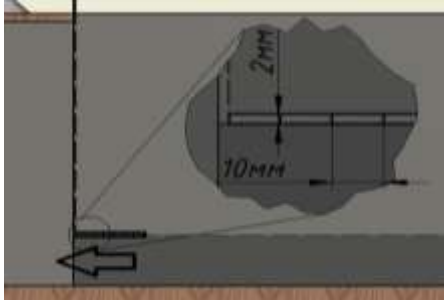


Рисунок 6 – Козырек над щелевой неплотностью укрытия, вид сбоку

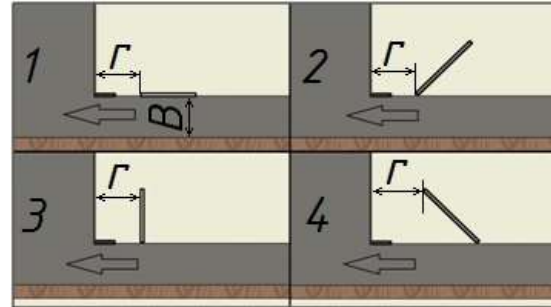


Рисунок 7 – Положения механического экрана в виде пластины

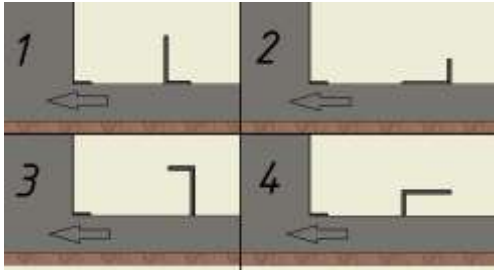


Рисунок 8 – Положения механического экрана в виде двугранного уголка

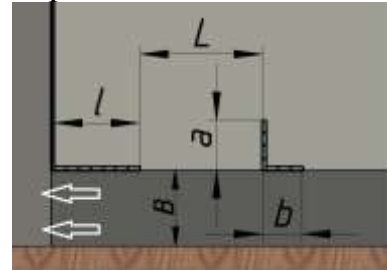


Рисунок 9 – Схема расположения козырька и экрана в виде уголка

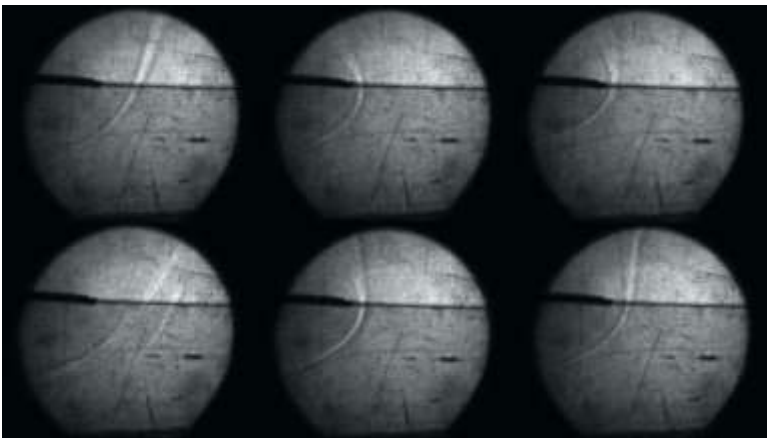


Рисунок 10 – Срыв потока воздуха с края козырька, установленного над щелевой неплотностью укрытия, вид сбоку

В результате экспериментов было выяснено, что при установке на входе в щелевую неплотность горизонтального козырька и экрана в виде уголка с высотой равной 1 калибру и шириной 0,5 калибра, при удалении его от козырька на 0,5-1 калибра к.м.с. увеличивается на величину более 16,6%. Максимальная величина отклонения к.м.с. $\delta \approx 45\%$ при оборудовании

неплотности горизонтальным козырьком и экраном в виде уголка, при этом расход воздуха через неплотность снижается на $\approx 17\%$ (рисунок 11). Кривые 1 – 6 при длинах горизонтальной части уголка $b/B = 1/6; 1/3; 1/2; 2/3; 5/6; 1$.

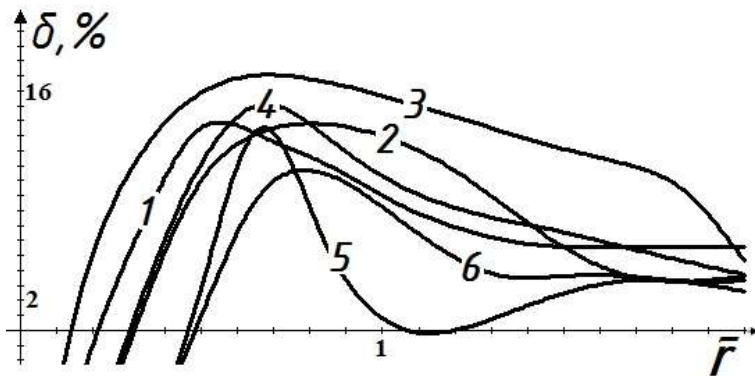


Рисунок 11 – Изменение величины δ от $\bar{r} = L/B$ при $a/B = 1$

Исходя из найденных параметров, разработано устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем, в соответствии с рисунком 12.

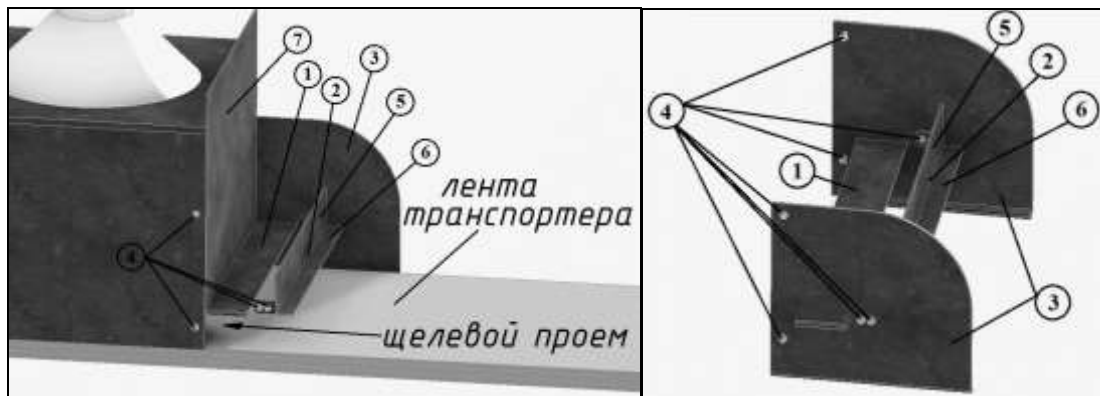


Рисунок 12 – Устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем.

1 - козырек, 2 - механический экран в виде прямого двугранного уголка с длинной 5 и короткой 6 гранями, 3 - стабилизирующие поток воздуха стенки, 4 - болтовое соединение, 7 - стенка аспирационного укрытия

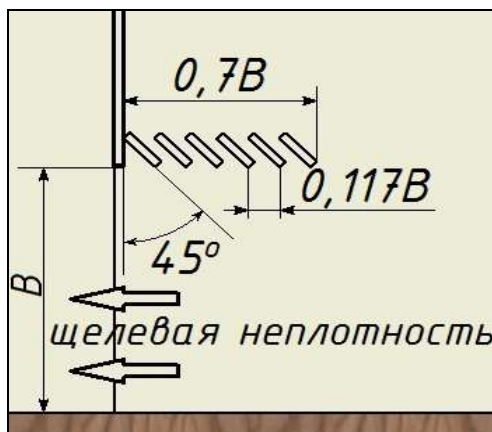


Рисунок 13 – Решетка из металлических пластин

Обнаружено также, что использование решетки из металлических пластин размером $1 \times 10 \times 435$ мм общей длиной 0,7 калибра, наклоненных под углом 45° , расстояние между которыми 0,117 калибра (рисунок 13) приводит к увеличению к.м.с. на $\delta \approx 47\%$ и снижению расхода воздуха на $\delta_G \approx 18\%$ (к.м.с. входа в неплотность $\zeta_1 = 1,82$, $\zeta_0 = 1,24$).

4. Разработана математическая модель отрыва потока на входе во всасывающие каналы, использующая многоугольные вихревые рамки.

Для расчета отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал использовалась осесимметричная стационарная и нестационарная постановки задачи, а также квазисимметричная, где использовались вихревые

многоугольные рамки, что усложняет расчеты, но дает возможность решать трехмерные задачи.

Влияние на произвольную точку $x(x_1, x_2, x_3)$ k -й вихревой n -угольной рамки единичной интенсивности (рисунок 14 а) определяется из выражения:

$$\mathbf{G}(x, k) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{[(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \times \mathbf{r}_i^k]}{|\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k|^2 |\mathbf{r}_i^k|^2 - ((\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_i^k)^2} \left(-\frac{(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_{i+1}^k}{|\mathbf{r}_{i+1}^k|} + \frac{(\mathbf{r}_{i+1}^k - \mathbf{r}_i^k) \cdot \mathbf{r}_i^k}{|\mathbf{r}_i^k|} \right), \quad (3)$$

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

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

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

Далее будем обозначать $G^{pk} = (\mathbf{G}(x^p, k) \cdot \mathbf{n})$, где, как и прежде x^p - p -я контрольная точка. Контрольные точки располагаются посередине между многоугольными вихревыми рамками, по поверхности трубы (рисунок 14 б) или в центре треугольных и четырехугольных вихревых рамок, расположенных во всасывающем сечении трубы (рисунок 14 в).

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

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

$$\sum_{k=1}^N G^{pk} \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau} \gamma^\tau = v^p, \quad (4)$$

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

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G^k \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m G^\tau \gamma^\tau, \quad (5)$$

где G^k - функция влияния на т. x k -й вихревой рамки, Γ^k - ее циркуляция, G^τ - функция влияния на точку x вихревой рамки, образованной в результате отрыва потока с острой кромки в момент времени τ .

В следующий момент времени с острой кромки сходит новая многоугольная вихревая рамка, старые сдвигаются по направлению потока, определяются неизвестные циркуляции граничных вихрей из системы (4) и т.д., пока не достигается заданная цель.

Новое положение вершины свободной рамки определяется из формулы

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

где (x, y, z) - координаты ее предыдущего положения, $\{v_x, v_y, v_z\}$ - координаты вектора скорости в данной точке (определяются при помощи формул (3), (5) в проекции на направления $\vec{n} = \{1, 0, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 1, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 0, 1\}$ соответственно).

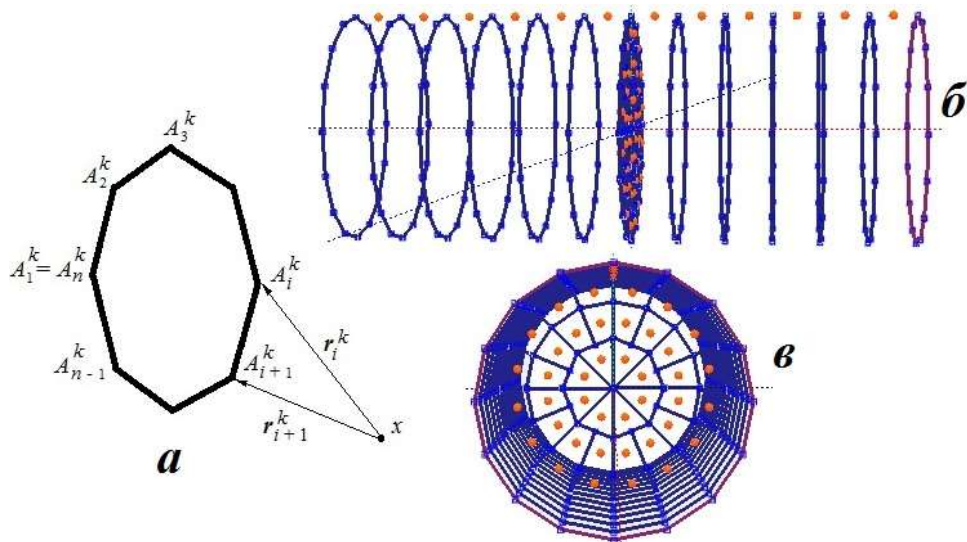


Рисунок 14 – Вихревые многоугольные рамки: а) влияние на точку x k -й вихревой n -угольной рамки; б) дискретизация боковой поверхности; в) дискретизация всасывающего сечения

В случае расположения некоторой точки на расстоянии меньшем радиуса дискретности от вихревой рамки, влияние последней на эту точку не учитывается.

В каждый модельный момент времени в воздушный поток будет срываться вихревая рамка с циркуляцией, равной циркуляции вихревой рамки, расположенной на острой кромке вытяжного отверстия. Циркуляция данной вихревой многоугольной рамки с течением времени не изменяется, в отличие от ее расположения.

Разработанная программа позволяет и обратить течение, то есть исследовать течение приточной турбулентной струи. В этом случае структура течения коррелируется с расчетами А.В.Дворак и Н.В.Хлапова.

Для проверки адекватности и достоверности рассмотренных моделей был произведен расчет осевой скорости в зависимости от расстояния до входа во всасывающее отверстие (рисунок 15). Сравнение производилось с экспериментальными данными Alden J.L. и расчетами по эмпирической формуле В.Н.Посохина.

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

Во всех моделях радиус трубы 0.2м; длина трубы 2м; расстояние между соседними присоединенными вихрями равнялось 0.01м; шаг дискретности 0.005м. Практически полное совпадение с экспериментальными данными демонстрируют расчеты, выполненные в рамках стационарной модели (кривая 5 на рисунке 15). Эта же модель с высокой точностью позволяет определить коэффициент сжатия струи и к.м.с. входа в трубу по формуле $\zeta = (1 - 1/(\delta_\infty / R)^2)^2$. Расчетное значение величины к.м.с. $\zeta \approx 1.08$ и отличается от экспериментального $\zeta = 1$ на 8%. Эта особенность модели позволяет исследовать влияние различных экранов и профилей на величину ζ .

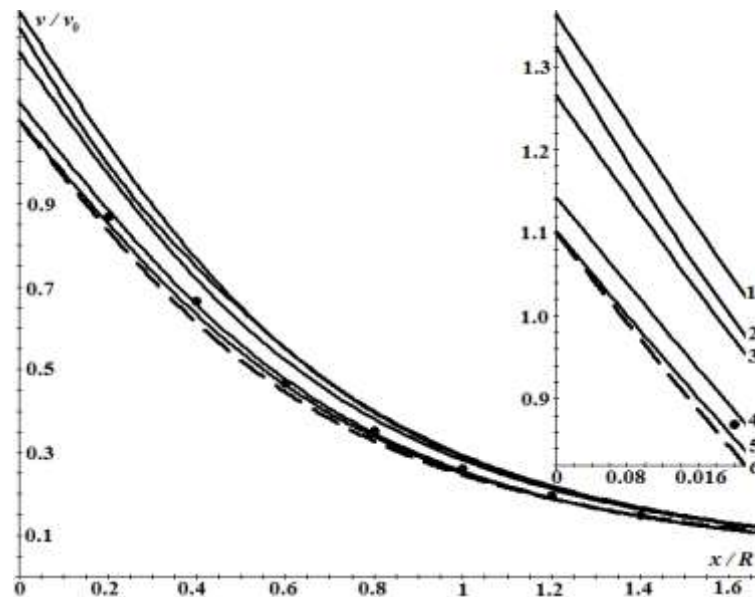


Рисунок 15 – Изменение безразмерной осевой скорости при удалении от входа в круглую трубу: 1-осесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0,005$; 2-квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0,005$; 3-осесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0,01$; 4-квазиосесимметричная задача в нестационарной постановке при $\Delta t = 0,01$; 5- осесимметричная задача в стационарной постановке; 6- экспериментальная кривая В.Н.Посохина; черные кружочки - экспериментальные данные J.L. Alden и J.M. Kane

Несколько завышенные величины скорости дают расчеты в рамках нестационарных моделей (кривые 1 – 4 рисунка 15). Все же ближе к эксперименту результаты решения задачи в квазиосесимметричной постановке (кривые 2, 4). Вихревая структура течения при этом имеет подобную структуру, что и для осесимметричной задачи в нестационарной постановке: вблизи стенок трубы образуется возвратная область течения, что не улавливает стационарная модель.

5. Впервые решена задача об отрыве потока на входе в квадратный всасывающий канал с острыми кромками, расположенный в неограниченном пространстве, с использованием разработанной компьютерной программы.

Дискретная математическая модель строилась с использованием квадратных вихревых рамок (присоединенные вихри) и расчетных точек, где выполняются условия непроницаемости на твердой поверхности (рисунок 16). Эти точки расположены на стенке трубы посередине между вихревыми рамками. Всасывающее сечение тоже разбивается на квадратные вихревые рамки, в центре каждой из которых содержится расчетная точка, где нормальная составляющая скорости равна скорости всасывания v_0 . Для решения задачи использовалась компьютерная программа, разработанная на основе вычислительной процедуры, изложенной в предыдущем разделе.

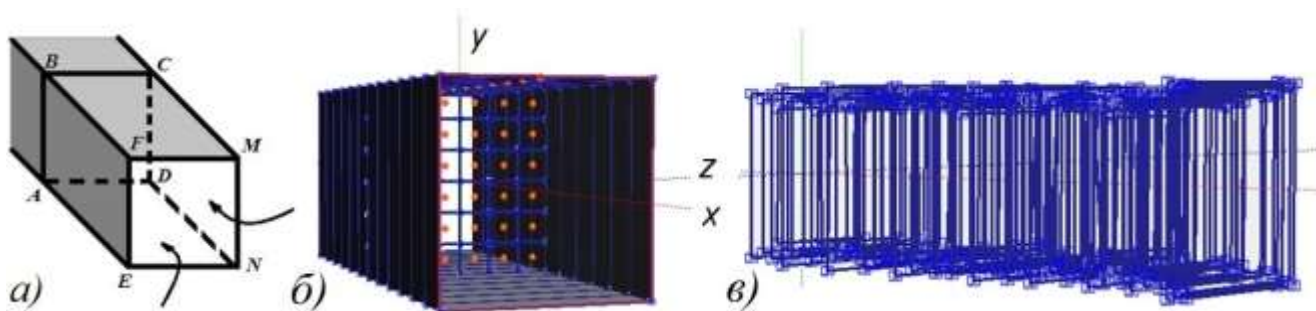


Рисунок 16 – Квадратный патрубок в неограниченном пространстве:
 а) схема течения; б) дискретная модель; в) свободные квадратные вихревые рамки, полностью заполнившие область течения внутри трубы

6. Получена аналитическая зависимость для определения поверхности отрыва на входе в квадратный всасывающий канал.

Для линий тока в системе координат, показанной на рисунке 17а, предлагаются следующие формулы расчета:

$$x = 1.72(|y| - 1)^2 - 2.88(|y| - 1) + 0.82 + 0.76 \ln(|y| - 0.66), \quad (6)$$

Здесь показаны линии тока в плоскости, проходящей через ось отсоса и через середины противоположных сторон. Ось Ox направлена по оси отсоса; оси Oy, Oz - через середины противоположных сторон. Все размеры отнесены к полустороне a квадрата. Понятно, что если в формуле (6) поменять y на z получим линии тока в плоскости XOz .

Отрывную поверхность тока в правой системе координат XYZ (рисунок 17а) можно определить из следующих уравнений:

$$(z \leq y \cap z \geq -y) \cup (z \geq y \cap z \leq -y) \Rightarrow$$

$$x = 1.72(|z| - 1)^2 - 2.88(|z| - 1) + 0.82 + 0.76 \ln(|z| - 0.66);$$

$$(z \geq y \cap z \geq -y) \cup (z \leq y \cap z \leq -y) \Rightarrow$$

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

Стоит отметить, что в этих формулах полагалось, что сжатое сечение имеет квадратную форму. Эта форма несколько нарушается при приближении к углам сечения (рисунок 17б).

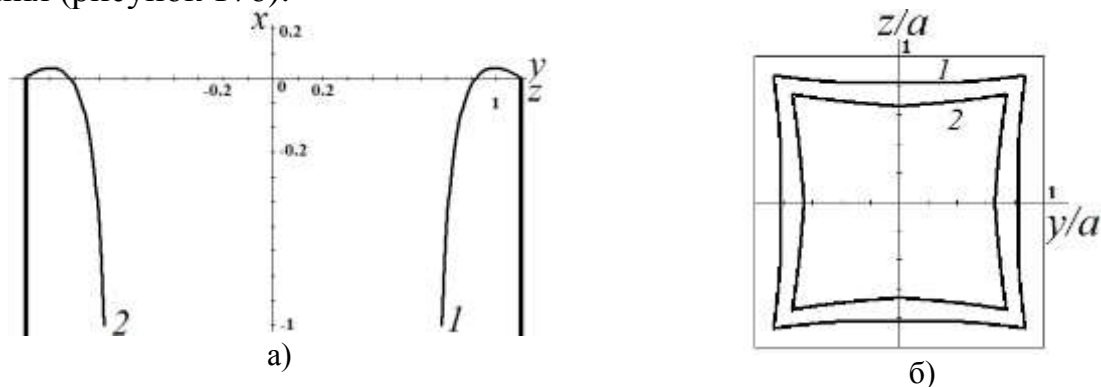


Рисунок 17 – а) - линии тока, построенные по формуле (6); б) - граница всасывающего сечения: кривая 1 - на входе в квадратную трубу; 2 - в сечении, заглубленном на расстояние $\approx 0.8a$

Площадь всасывающего сечения равна $\approx 0.699 a^2$, что на $\approx 4\%$ больше, чем если считать его квадратным с площадью равной $\approx 0.672 a^2$. Площадь эффективного всасывания в сечении, заглубленном на расстояние $\approx 0.8a$ от входа в трубу, составляет $0.50675 a^2$. Если посчитать к.м.с. по формуле Борда, то $\zeta \approx 0,95$, что корреспондируется с данными практики, где принято считать этот коэффициент равным 1.

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

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

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

3. На разработанном полупромышленном образце укрытия с неплотностью прямоугольной формы проведены экспериментальные исследования влияния горизонтальных, вертикальных, наклонных и двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в неплотность. Показано, что оборудование щелевой неплотности горизонтальным козырьком длиной 0,5-0,7 калибра (калибр - высота неплотности) и уголком высотой в 1 калибр и шириной 0,5 калибра на расстоянии до козырька в диапазоне 0,5-1 калибра позволяет снизить расход воздуха более 17%.

4. Разработаны методы математического моделирования и их программно-алгоритмическая поддержка для расчета осесимметричных и пространственных отрывных течений в спектрах действия вытяжных каналов. Использование стационарных дискретных вихрей позволяет с достаточной точностью определять поле скоростей, границы отрыва потока и к.м.с. на входе во всасывающее отверстие. Моделирование нестационарных течений при помощи

кольцевых вихревых особенностей позволяет исследовать вихревые течения в застойных областях и определять пульсации скорости. Использование вихревых многоугольников дает дополнительную возможность исследования пространственных течений в областях с приточными и вытяжными каналами, выявлять зависимости взаимодействия приточных и вытяжных струйных течений.

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

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Ходаков, И.В.** Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами [Текст] / **И.В. Ходаков** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №3. – С. 6-12. (0,81 п.л.)
2. **Ходаков, И.В.** Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие / **И.В. Ходаков** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №2. – С. 11-15. (0,58 п.л.)
3. **Ходаков, И.В.** Снижение энергоемкости аспирационных укрытий за счет аэродинамического экранирования щелевых неплотностей [Текст] / **И.В. Ходаков** [и др.] // Новые огнеупоры. – 2015. – № 4. – С. 56-61. (0,69/0,23 п.л.)
4. **Ходаков, И.В.** О моделировании отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал [Электронный ресурс] / **И.В. Ходаков** [и др.] // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2013. – №Т.14. – С. 246-253. – URL: http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2013/pdf/v14r127.pdf. (0,92/0,19 п.л.)
5. **Ходаков, И.В.** К задаче о моделировании истечения идеальной жидкости из дна резервуара [Электронный ресурс] / **И.В. Ходаков** [и др.] // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). – 2014. – №Т.15. – С. 59-69. – URL: http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2014/pdf/v15r106.pdf. (1,27/0,32 п.л.)
6. **Ходаков, И.В.** Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами [Текст] / **И.В. Ходаков** [и др.] // Новые огнеупоры. – 2013. – №10. – С. 57-61. (1,27/0,32 п.л.)

7. **Ходаков, И.В.** Моделирование отрывного течения на входе в квадратный всасывающий канал [Текст] / **И.В. Ходаков** [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – №6. – С. 97-104. (0,93/0,19 п.л.)

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science

8. **Khodakov, I.V.** Modeling Detached Flows at the Inlet to Round Suction Flues With Annular Screens [Text] / **I.V. Khodakov** [etc.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – 54(5). – P. 425-429. (0,58/0,14 п.л.)

9. **Khodakov, I.V.** About the modeling of detachable flows on the entrance of the round soaking-up branch pipe [Electronic resource] / **I.V. Khodakov** [etc.] // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – 17(8). – P. 1187-1193. URL: [http://www.idosi.org/mejsr/mejsr17\(8\)13/24.pdf](http://www.idosi.org/mejsr/mejsr17(8)13/24.pdf). (0,81/0,20 п.л.)

10. **Khodakov, I.V.** Modeling separated flows using stationary discrete vortices [Electronic resource] / **I.V. Khodakov** [etc.] // Canadian Center of Science and Education Modern Applied Science. – 2015. – 9(3). – P. 291-298. URL: <http://ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/45957/24897>. (0,93/0,19 п.л.)

11. **Khodakov, I.V.** Simulation of the process of flow separation at the entrance of square aspirating port [Electronic resource] / **I.V. Khodakov** [etc.] // American Journal of Environmental Sciences. – 2014. – 10(5). – P. 509-515. URL: <http://thescipub.com/PDF/ajessp.2014.509.515.pdf>. (0,81/0,16 п.л.)

12. **Khodakov, I.V.** Decreasing the Power Requirements of Ventilation Shelters Through Aerodynamic Screening of Slot Leakages [Text] / О.А. Аверкова, К.И. Логачев, **I.V. Khodakov** // Refractories and Industrial Ceramics – 2015. - 56(2). – P. 204-209. (0,69/0,23 п.л.)

Доклады и материалы конференций

13. **Ходаков, И.** Моделирование истечения идеальной жидкости из резервуара [Текст] / **И. Ходаков** [и др.] // XVI Международный симпозиум МДОЗМФ-2013 (Харьков-Херсон, 10-15 июня 2013): Харьков-Херсон, 2013. – С. 18-21. (0,46/0,12 п.л.)

14. **Ходаков, И.** Использование эффекта отрыва струи для снижения расхода воздуха через неплотности аспирационных укрытий [Текст] / **И.В. Ходаков.** // международная научно-практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике»: Ростов-на-Дону – ИЦРОН, 2014. – С. 70-74. (0,58 п.л.)

15. **Ходаков, И.** Усредненные характеристики вихревых областей на входе в круглый сток-раструб [Текст] / **И.В. Ходаков** [и др.] // конференция «Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие» (Ижевск, 23–28 июня 2014г.): Ижевск – ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 2014. – С. 162-167. (0,69/0,17 п.л.)

16. **Khodakov I.** Modeling of flow separation at the entrance of round intake channel [Text] / **I.V. Khodakov** [etc.] // The 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya 17-20 Nov. 2014): Japan, Nagoya, 2014. – бр. (0,69 п.л.)

Свидетельства о регистрации программы

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013614881 Российская федерация. Расчет истечения плоской струи идеальной жидкости / О.А. Аверкова, К.И. Логачев, И.В. Ходаков; заявители и

правообладатели О.А. Аверкова, К.И. Логачев, И.В. Ходаков. – №2013611705; заявл. 28.02.13г.; зарег. 22.05.13.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013616992 Российская федерация. Расчет отрывного течения на входе в круглый патрубок с экранами / О.А. Аверкова, К.И. Логачев, И.В. Ходаков; заявители и правообладатели О.А. Аверкова, К.И. Логачев, И.В. Ходаков. – №2013614743; заявл. 10.06.13; зарег. 30.07.13.

Патенты

19. ПМ 154236 Российская Федерация, МПК⁷ F24F 13/08. Устройство для снижения подсоса воздуха через щелевой проем [Текст] / **Ходаков И.В.** [и др.] ; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» – №2014150007/12 ; заявл. 10.12.14 ; опубл. 20.08.15, Бюл. №23 – 2 с. : ил.