

На правах рукописи



ЛОГАЧЕВ АРТУР КОНСТАНТИНОВИЧ

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель **Аверкова Ольга Александровна**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Сафиуллин Ринат Габдуллович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Теплоэнергетика, газоснабжение и вентиляция», доцент, г. Казань;

Боровков Дмитрий Павлович
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве», г. Волгоград

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

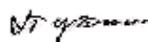
Защита диссертации состоится 25 декабря 2018 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (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 <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/logachev-artur-konstantinovich>.

Автореферат расослан 24 октября 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Виктор Алексеевич Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, удаляемого 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 зонтик, 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 № 14-41-08005р_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., Коньшева 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 струей 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 прямооточной 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. Использованы 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 «Бел АгроПроект».

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 прямооточной 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, натурных 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 прямооточными и закрученными воздушными струями.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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.

Для разработки метода расчёта отрывного течения при входе в круглый отсос-раструб использовались дискретные бесконечно тонкие вихревые кольца.

Граница отсоса раструба дискретизирована набором присоединённых вихревых колец и контрольных точек (произвольных точек на окружности, охватывающей отсос-раструб). Свободная поверхность тока начинается на острой кромке раструба, для неё задаётся начальное приближение. Дискретная модель в меридиональной полуплоскости изображена на рисунке 1.

Крестиками изображены расчётные точки, в которых выполняется условие 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 n определяется с помощью формулы:

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

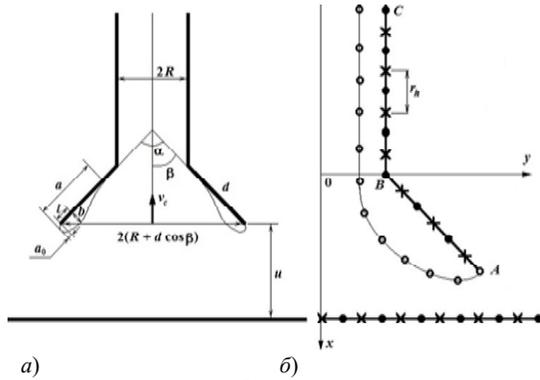


Рисунок 1 – Отсос-раструб над непроницаемой плоскостью: а) область течения; б) дискретизация границы области

Итерационный метод расчета состоит в следующем. Задаются начальные координаты свободных вихрей. При $p = 1, 2, \dots, N; q = 1, 2, \dots, N$ определяется матрица $G(x^p, \xi^q) = G^{pq}$. Стартует первая итерация. Вычисляется вектор-матрица свободных членов:

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

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

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

С использованием формулы (1) строится свободная поверхность тока. Новые координаты (x', y') свободных вихрей определяется из старых по формулам: $x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $y' = y + \Delta t v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, где Δt – модельный шаг по времени. Дискретная свободная поверхность тока состояла из вихревых колец, удалённых на расстояние r_h (шаг дискретности) друг от друга.

После находятя параметры отрывной области течения по разработанной компьютерной программе.

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.

Наблюдается рост всех характерных размеров отрывной области с увеличением длины раструба. Как видно, длина отрывной области a увеличивается при приближении к плоскости (рисунок 2, а). Вынос струи за раструб (рисунок 2, б) и максимальная толщина b отрывной области (рисунок 2,с) вначале возрастают при удалении от плоскости, затем убывают, имеют

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 $G(x, \xi)$ – функция влияния та точку x единичного вихревого кольца, при $x = \xi$, функция $G(x, \xi) = 0$.

максимум при $u \approx 5R$. Вычислительный эксперимент показал, что максимум радиуса эффективного всасывания наблюдается в диапазоне $\beta = 60^\circ - 65^\circ$.

Формула для расчета линии отрыва потока на входе в раструб, установленного перпендикулярно патрубку:

$$\bar{x}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2.5\pi}{3.11-4.5\pi}}}{R(t-1.5\pi)^b} \cos t,$$

$$\bar{y}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2.5\pi}{3.11-4.5\pi}}}{R(t-1.5\pi)^b} \sin t + 1 + \bar{d},$$

$$1.5\pi < t \leq 2.5\pi,$$

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

$$a = (0.03\bar{d} - 0.034) \frac{\beta}{\pi} + 0.01\bar{d} + 0.032,$$

$$\bar{d} = d/R, b = 0.14(1 + 1/\bar{u}),$$

$$\bar{u} = u/R.$$

Траектории пылевых частиц строились с использованием системы обыкновенных дифференциального уравнения ее динамики:

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

где $v_a = \{v_{ax}, v_{ay}\}$ – скорость воздушного потока; ρ_a – его плотность; $v_p = \{v_{px}, v_{py}\}$ – вектор скорости пылевой частицы; ρ_p, d_e, χ, ψ – её плотность, эквивалентный диаметр, коэффициент формы и коэффициент лобового сопротивления; g – ускорения свободного падения; $S_m = \pi d_e^2/4$.

По разработанному вычислительному алгоритму предельные траектории частиц пыли при скорости всасывания 10 м/с для раструбов длиной R и $5R$ изображены на рисунках 3-4.

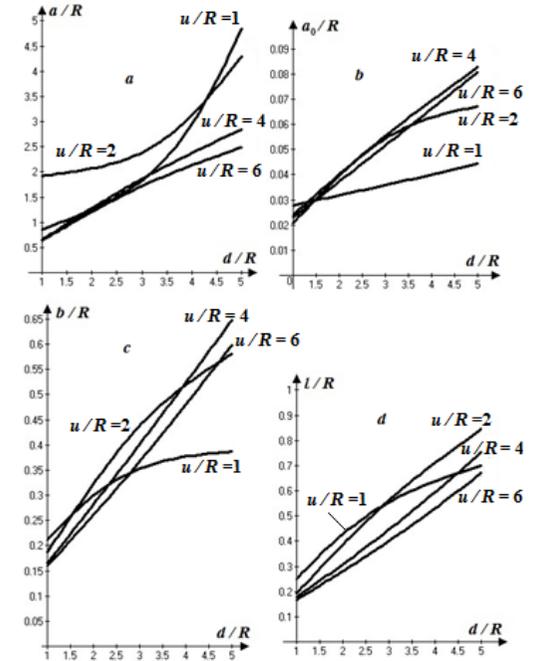


Рисунок 2 – Изменение параметров вихревой области в зависимости от длины раструба и разной удаленности от плоскости u/R

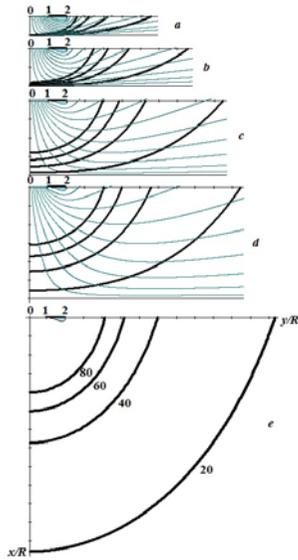


Рисунок 3 – Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20 мкм, 40 мкм, 60 мкм, 80 мкм в спектре действия отсоса-раструба длиной R , $\beta = 90^\circ$ и разным удалением от плоскости: а) $u = R$; б) $u = 2R$; в) $u = 4R$; д) $u = 6R$; е) без плоскости

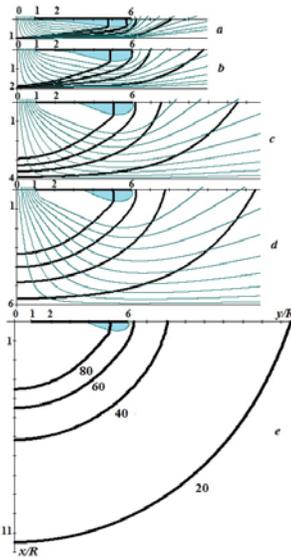


Рисунок 4 – Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметрами 20 мкм, 40 мкм, 60 мкм, 80 мкм в спектре действия отсоса-раструба длиной $5R$, $\beta = 90^\circ$ и разным удалением от плоскости: а) $u = R$; б) $u = 2R$; в) $u = 4R$; д) $u = 6R$; е) без плоскости

Объем фигуры между плоскостью, проходящей через острые кромки раструба и поверхностью, состоящей из предельных траекторий частиц пыли назывался объемом аспирации V_a . Для конкретной пылинки он определялся при помощи построения предельной траектории данной частицы.

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

$$k = V_a / V_0,$$

V_0 – объем аспирации всасывающего круглого патрубка без раструба.

В случае расположения отсоса-раструба над неограниченной плоскостью наиболее эффективным является раструб с углом $\beta = 90^\circ$.

Коэффициент улавливания растёт при увеличении длины раструба, независимо от расстояния до непроницаемой плоскости. Скорость роста коэффициента улавливания падает с увеличением расстояния до плоскости и уменьшением диаметра пылевых частиц.

Наличие плоскости оказывает существенное влияние на объем 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 объему 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 объема аспирации для случая отсутствия непроницаемой плоскости.

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.

В случае наличия набегающего потока скорость воздушного потока в точке x вдоль единичного направления n вычисляется при помощи формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) + n_1 v_\infty. \quad (2)$$

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

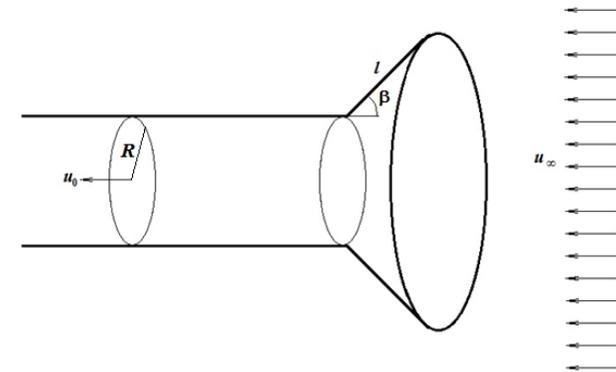


Рисунок 5 – Отсос-раструб при набегающем потоке

Вычислительный итерационный процесс состоял из следующих шагов. Составляется вектор-массив свободных членов

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

Изменяются начальные коэффициенты:

$$G(x^p, \xi^1) = P(x^p) + \sum_{k=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^k), \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

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

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: $\gamma = \Gamma^{-1}$.

Строится отрывная поверхность тока с кромки A .

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

Траектории пылевых частиц строились путём численного решения следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{\bar{\Psi} \chi u_\infty}{2 \cdot \text{Stk} \cdot R} (v_{px} - v_{ax}), \quad \frac{dx}{dt} = v_{px}, \quad \frac{dv_{py}}{dt} = -g - \frac{\bar{\Psi} \chi u_\infty}{2 \cdot \text{Stk} \cdot R} (v_{py} - v_{ar}), \quad \frac{dy}{dt} = v_{py},$$

где $\text{Stk} = \rho_p d_c^2 u_\infty / (36\mu R)$ – число Стокса, $\bar{\Psi} = 1$, при $\text{Re} < 1$;

$(1 + \text{Re}^{2/3} / 6)$, при $1 \leq \text{Re} < 10^3$; $(1 + 0,065 \text{Re}^{2/3})^{1.5}$, при $\text{Re} \geq 10^3$.

Коэффициент аспирации определялся из формулы: $A = v_\infty R_c^2 / (v_0 R^2)$, где R_c – расстояние от оси отсоса предельной траектории частицы, построенной с точки, удалённой от входа в патрубок на расстояние $100R$.

Верификация метода математического моделирования производилась путём сравнения с расчётами других авторов для случая набегающего потока на круглый всасывающий патрубок (рисунки 6-7). 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. 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); линия 4 – расчёт по разработанному методу; 5 – свободные поверхности тока, построенные по разработанным алгоритмам. Сравнение расчётных данных показывает, что расчёты критической линии тока адекватны, причём произведённые в рамках данной работы расчёты близки к расчётам с учётом вязкости.

Сравнение изменения величины коэффициента аспирации от безразмерной величины скорости набегающего потока и разных числах Стокса представлены на рисунке 7, где наблюдается хорошее согласование расчетов с использованием разработанной вычислительной процедуры и расчетов, проведённых Зариповым Ш.Х., в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости. Максимальное различие наблюдается при $\text{Stk}=0,1$ и $\bar{v} = 0,02$, но и оно не превышает 7 %.

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

гающего потока (рисунок 8). Линия 1 – график изменения величины R_s , Линия 2 – δ_∞ . Они имеют две общие точки: первая – при равенстве величин и направления скорости всасывания и набегающего внешнего потока; вторая – при росте скорости набегающего внешнего потока в противоположном направлении относительно скорости всасывания. Линии 3 и 4 – это зависимости R_s и δ_∞ , найденные при помощи алгоритма, изложенного в п. 1 автореферата. Линия 5 изменения величины $\bar{\delta}_\infty$ для щелевидного всасывающего отверстия, построена с использованием метода конформных отображений для щелевидного отсоса.

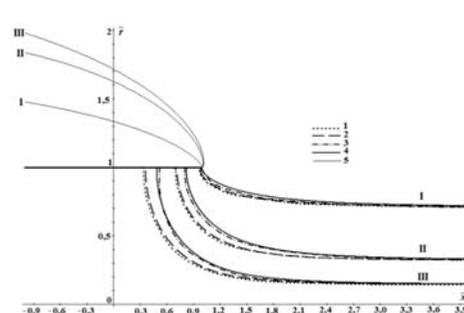


Рисунок 6 – Критические и свободные линии тока вблизи круглого всасывающего патрубка с тонкими стенками

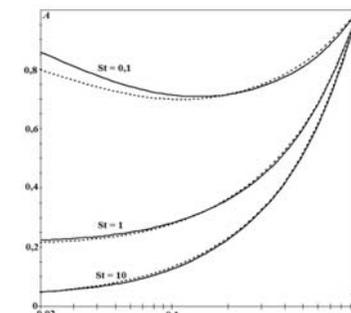


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента аспирации A от безразмерной скорости набегающего потока \bar{v}

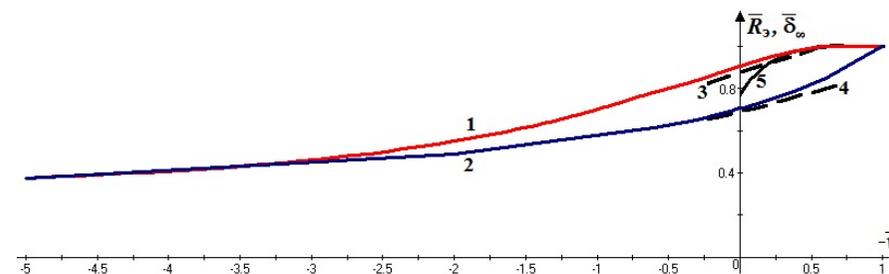


Рисунок 8 – Изменение размеров отрывной области

Графики зависимости коэффициента A от длины d раструба, при $\beta = 90^\circ$ представлены на рисунках 9–10. При $\text{Stk} \rightarrow 0$ коэффициент аспирации $A \rightarrow 1$ при разных длинах d раструба. При увеличении числа Stk коэффициент A уменьшается при росте величины d .

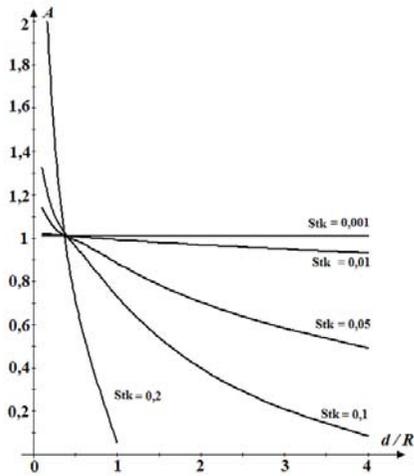


Рисунок 9 – Зависимости $A(d)$ при $\beta = 90^\circ$, $\bar{u} = 0,6$

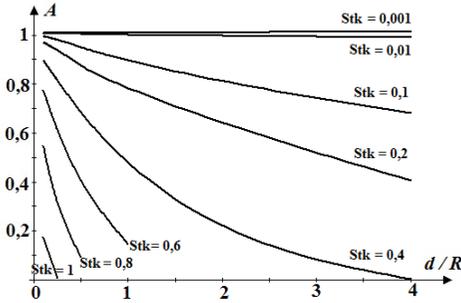


Рисунок 10 – Зависимости $A(d)$ при $\beta = 90^\circ$, $\bar{u} = 1,2$

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

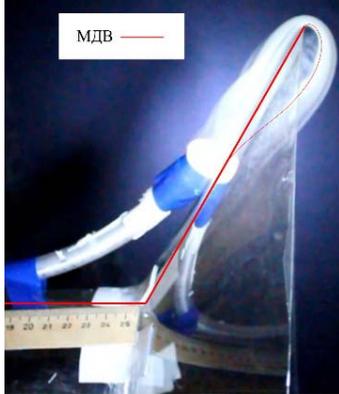


Рисунок 11 – Отрывная область на входе в раструбу длиной равной $3R$ с углом наклона 60° : МДВ – расчёт по разработанной программе с использованием метода дискретных вихрей

Эксперименты выполнялись на разработанной экспериментальной установке. Для визуализации потока использовался увлажнитель воздуха Polaris, генерирующий с помощью ультразвуковой мембраны холодный пар (рисунок 11). Поле скоростей измерялось термоанемометром Testo-425.

Произведено сравнение между экспериментально измеренными величинами скорости (рисунок 12) и размерами отрывной области с расчётными данными по разработанному вычислительному алгоритму и компьютерной программе.

Полученные расчётные значения скорости:

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

– достоверны относительно экспериментальных в подавляющем количестве случаев: более чем в 93 % средние значения совпадают;
 – дают удовлетворительную адекватность, относительно экспериментальных: в более чем 80 % случаев разброс данных относительно средних совпадает.

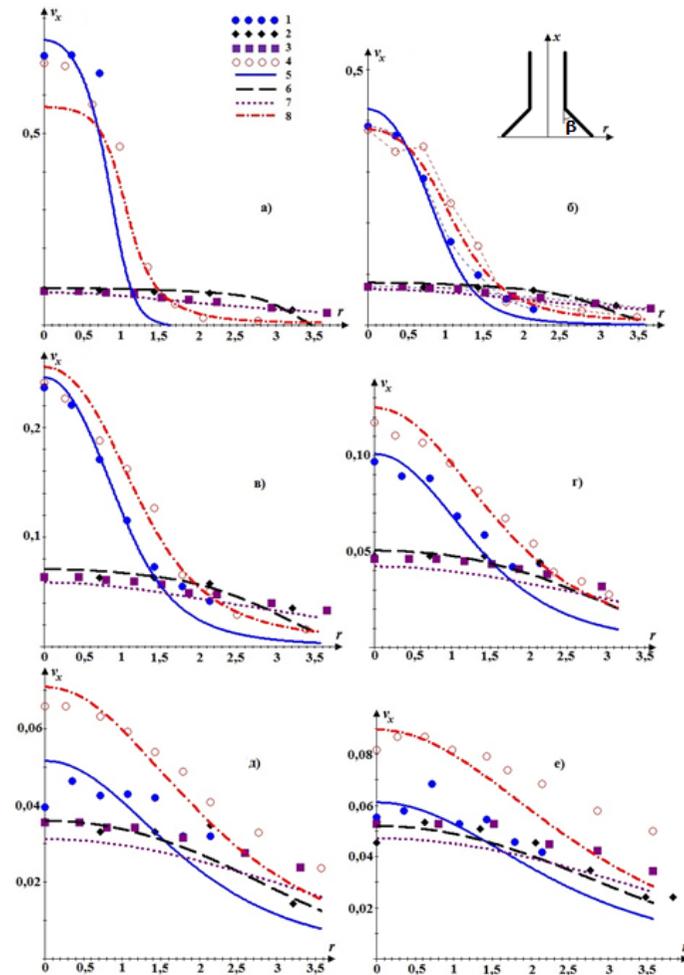


Рисунок 12 – Профили осевой составляющей скорости вблизи отсоса с раструбом длиной $5R$: $a - x/R = 0.36$; $b - x/R = 0.71$; $b - x/R = 1.07$; $c - x/R = 1.79$; $d - x/R = 2.68$; $e - x/R = 3.211$; экспериментальные величины безразмерной осевой составляющей скорости: 1 – $\beta = 0^\circ$; 2 – $\beta = 30^\circ$; 3 – $\beta = 60^\circ$; 4 – $\beta = 90^\circ$; расчётные величины безразмерной осевой составляющей скорости: 5 – $\beta = 0^\circ$; 6 – $\beta = 30^\circ$; 7 – $\beta = 60^\circ$; 8 – $\beta = 90^\circ$

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

Рассматривался круглый патрубок, который содержит всасывающий канал радиуса r и кольцевое отверстие с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 , из которого истекает приточная струя (рисунок 13). Точка M удалена от входного сечения в канал на расстояние l . Обозначим $r_2 - r_1 = d$; скорость внутри всасывающего канала v_0 ; скорость в кольцевом отверстии v_p .

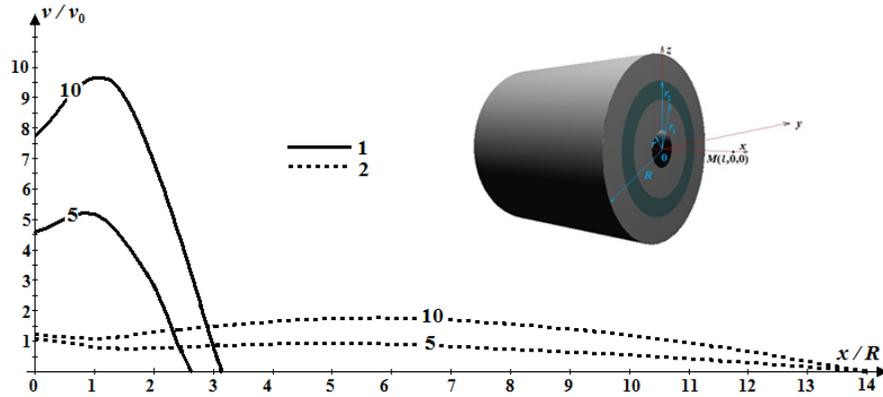


Рисунок 13 – Изменение скорости воздушного потока на оси отсоса в зависимости от расстояния до входа в отсос:

1 – расчёт при помощи МДВ при экранировании приточной воздушной струей, 2 – расчёт методом SST

Для решения задачи использовался метод дискретных вихревых многоугольников (МДВ).

Функция влияния здесь приобретает следующий вид:

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

где $r_i^k = \{A_{1i}^k - x_1, A_{2i}^k - x_2, A_{3i}^k - x_3\}$, $A_i^k (A_{1i}^k, A_{2i}^k, A_{3i}^k)$ – i -вершина рамки под номером k .

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

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

где $\Gamma(k)$ – интенсивность вихревой рамки. Для краткости далее введено обозначение $G^{pk} = (G(x^p, k) \cdot n)$, x^p – p -я расчётная (контрольная) точка. Эти точки рас-

полагались посредине между рамками по границе трубы и в центре данных рамок во всасывающем или приточном сечениях.

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; $G^{\tau l}$ функция влияния той же рамки на точку x .

При действии отсоса и приточной кольцевой струи (рисунок 13) расчёты при помощи МДВ производились при длине трубы 1 м; радиусе $r = 0,16$ 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 100; количестве отрезков в рамке 16; шаге дискретности 0,005 м; скорости притока v_p равной 5 и 10 м/с; шаг по времени вычислялся путем деления шага дискретности на скорость истечения струи и, соответственно, был равен: 0,001 с, 0,0005 с. Производилось моделирование до 1000-1300 шага по времени. Вихри заполняли пространство на удалении 10 калибров от входа во всасывающий канал, 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 похож (рисунок 13). Цифры 5 и 10 на рисунке обозначают безразмерные скорости истечения кольцевой струи. При удалении от всасывающего сечения 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. При расчётах по разработанной при помощи МДВ компьютерной программе оказалось, что длина этой области изменяется от 2,5 до 3 калибров калибр – радиус всасывающего канала). В случае закрутки струи с интенсивность 0,904 протяжённость данной области существенно увеличивается – до 14 калибров. Здесь расчёт производился методом при помощи численного решения уравнений Рейнольдса и моделей переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport или SST), расчёт закрученной струи при помощи МДВ по данному алгоритму не возможен.

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

Применение закрученной кольцевой струи значительно изменяет картину течения (рисунок 14).

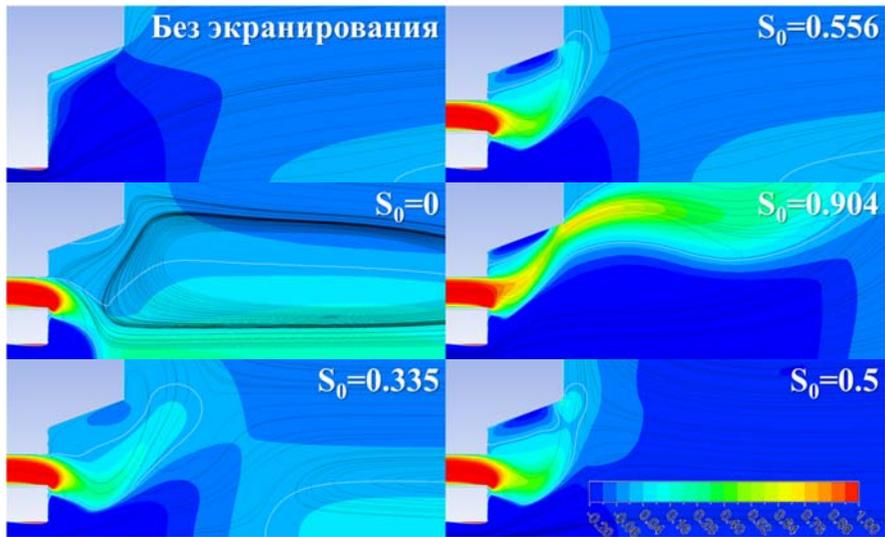


Рисунок 14 – Контуры осевой скорости (U/U_0) и линии тока при различной закрутке кольцевой струи для $Q_s/Q_0=1.0$ и $D_s/D_0=0.23$

Рассматривались разные расходы отсасываемого воздуха (рис. 14-15) в вытяжном канале: $Q_s = 0.5Q_0$, $Q_s = 1.0Q_0$; два значения радиуса центрального канала: $R_s = 0.23R_0$, $0.46R_0$. Производился также расчёт в случае отсутствия кольцевой струи (No Annular Jet).

Из анализа рисунка 15, где проиллюстрировано изменение осевой скорости при фиксированной величине закрутки кольцевой струи и разных расходах отсасываемого воздуха и радиусов всасывающего канала заключаем, что наиболее интенсивное обратное течение наблюдается для случая $S = 0.904$ при $Q_s = 0.5$. С увеличением радиуса R_s величина обратного тока вблизи входа в трубу уменьшается.

Наиболее равномерный забор газа из рассматриваемой области вдали от оси наблюдается при уменьшении закрутки до $S_0=0.5$, в этом случае обратные токи наблюдаются практически во всей расчётной области.

Наиболее интенсивный забор газа из аспирируемой области вблизи оси наблюдается при умеренных и сильных закрутках ($S_0=0.556$ и $S_0=0.904$) в случае $Q_s=0.5Q_0$. Максимальная дальность кольцевой осесимметричной струи при выбранных значениях закрутки составляет более $4D_0$. По сравнению со случаем забора газа из рассматриваемой области только всасывающим каналом дальность увеличивается более чем в 4 раза.

Для случая $Q_s=1.0Q_0$ влияние кольцевой струи оказывается не столь значимым. В случае отсутствия закрутки ($S_0=0$) в кольцевой струе обратные токи наблюдаются только в непосредственной близости от всасывающего канала.

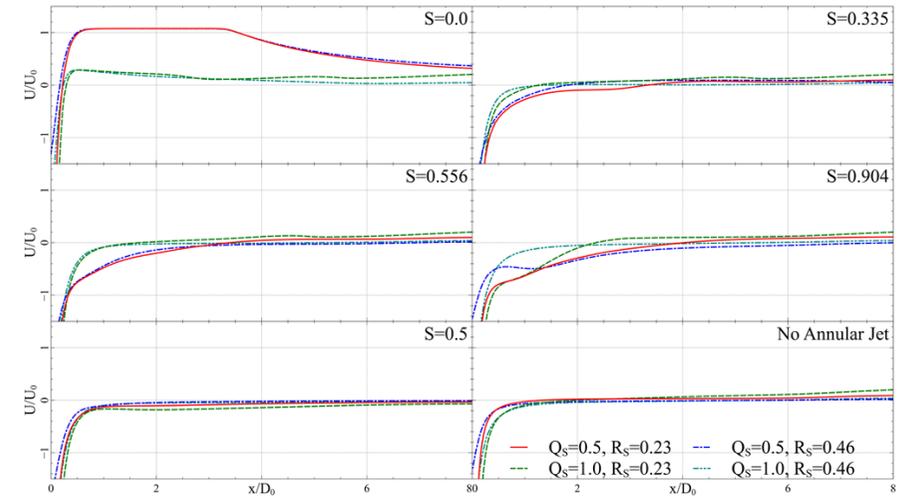


Рисунок 15. Изменение осевой скорости течения

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 измеренными 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 струёй, 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.

III. НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в ведущих научных журналах

1. **Логачев, А. К.** Моделирование пылевоздушного течения в зоне действия местного отсоса – раструба// Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – №7. – С.129-134.

2. **Логачев, А. К.** К вопросу о моделировании воздушного течения вблизи приточно-вытяжного устройства// Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №6. – С.188-193.

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

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

5. **Логачев, А.К.** Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами / **А.К. Логачев** [и др.] // Учёные записки ЦАГИ. – 2013. – Т.44, №2. – С.33-49.

Научные труды, индексируемые в Scopus и WoS

6. **Logachev, A.K.** Modeling of gas separated flows at inlet of suction channels on the basis of stationary discrete vortices / **A. K. Logachev** [etc.] // ECCOMAS 2012 – European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, e-Book Full Papers 2012. – P.812-831.

7. **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 Ceramic. – 2016. – V.56, №6. – 679-683.

8. **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 Ceramic. – 2016. – V.57, №1. – С. 103-107.

9. **Logachev, A.K.** Dynamics of dust particles near the round bell suction inlet / **A. K. Logachev** [etc.] // ECCOMAS 2016 – European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, e-Book Full Papers 2016. – P. 1-14.

10. **Logachev, A. K.** Method of calculating the separation flow with dust particles at the entrance to round suction pipe in conditions of the approach flow / **A. K. Logachev** O. A. Averkova, E. I. Tolmacheva // VII International Conference on Computational

Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2017). P. 381-392

Объекты интеллектуальной собственности

11. Пат. RU 2503891 С2 Российская Федерация МПК F24F 13/08 (2006.01) Способ управления отрывом воздушного потока на входе во всасывающие каналы [Текст] / **А.К. Логачев** [и др.] ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). – № 2012114363/12. Заявл. 11.04.2012. Опубликовано: 10.01.2014 Бюл. № 1 – 7 с.

12. 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.

13. 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.

Статьи в других изданиях

14. **Логачев, А. К.** О методе численного моделирования отрыва потока на входе в круглый тонкостенный патрубок / **А.К. Логачев** [и др.] // Вычислительные методы и программирование. – 2016. Т. 17. – С.189-196.

15. **Логачев, А. К.** Numerical Modeling of Air Flow at the Input-Outlet Unit Range of Action/ **А. К. Logachev** [etc.] // ICVFM 2016 – International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, e-Book Full Papers 2016. – P.1-14.

16. **Логачев, А.К.** Моделирование пылевоздушных потоков на входе в стоки-раструбы// Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017» [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс. – 2017. Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2017/data/10845/uid139962_report.pdf. – С.1-2.

17. **Логачев, А.К.** Расчет траекторий пылевых частиц вблизи круглого местного вентиляционного отсоса-раструба // Сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство — формирование среды жизнедеятельности» [Электронный ресурс]. – М: Изд-во Моск. гос. строит. унта, 2017. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/> – С.1013-1016.

18. **Логачев, А.К.** Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации

пылегазовых выделений [Электронный ресурс]/ **А.К. Логачев** [и др.] // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (20.04.2017-21.04.2017), Белгород – БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. – Режим доступа: <http://conf.bstu.ru/shared/attachments/151117> – С. 170-179.

19. **Логачев, А.К.** Моделирование динамики пылевых частиц в спектре действия стока-раструба// Труды III международной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века». – Казань: Изд-во АН РТ, 2017. – Режим доступа: http://kpfu.ru/portal/docs/F530625940/sbornik_tezisov.ready.pdf – С. 651-658.

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 04.10.2018. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 111.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.

