

На правах рукописи

Стрелец Ксения Игоревна

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЫЛЕУДАЛЕНИЯ
В ПРОТИВОТОЧНЫХ ЦИКЛОНАХ**

Специальность 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Ватин Николай Иванович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор,
Петриченко Михаил Романович
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, Крупкин Григорий
Яковлевич

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет»

Защита состоится «28» декабря 2010 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 29, Гидрокорпус-2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «26» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.17,
доктор технических наук, профессор

Сидоренко Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Обеспечение качества воздуха, в том числе при промышленном производстве, в современных условиях является актуальной задачей. Опасные концентрации промышленных выбросов вызывают серьезные последствия для окружающей и среды, а также могут вызывать серьезные заболевания человека. Эта проблема рассматривается в различных областях науки и техники: экологической, физико-механической, инженерной и др.

Уменьшение содержания вредных примесей в воздухе промышленных предприятий может идти по нескольким направлениям. Одним из важнейших является совершенствование пылеулавливающего оборудования. Оборудование для очистки промышленных газов должно обеспечивать необходимое качество воздушной среды, установленное санитарно-гигиеническими требованиями, а также высокие технико-экономические показатели.

Распространенным средством пылеудаления являются противоточные циклоны. Практика их использования имеет длительную историю, вместе с тем актуальной является задача дальнейшего совершенствования конструкций циклонов. Для этого требуется разработка новых методик расчета технической эффективности, обеспечивающая учет технологических особенностей процесса, при котором образуется пыль, свойств различных видов пыли и требований к эффективности пылеудаления.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью создания новых методик расчета эффективности пылеудаления в циклоне, позволяющих усовершенствовать его конструкцию.

Целью работы является метод расчета технической эффективности пылеудаления в циклоне. Метод расчета позволяет учитывать влияние геометрических параметров циклона на его эффективность, влияние турбулентности потока газа на процесс удаления мелких частиц, обеспечивать учет характеристик пыли, в том числе их форму и плотность частицы. Метод должен стать основой для усовершенствования конструкции циклона и рекомендаций по выбору параметров циклона для конкретных условий производства. Поставленная цель может быть достигнута с использованием

экспериментальных и теоретических исследований на основе методов технической механики жидкости и газа.

Для достижения цели были решены следующие задачи.

1. Разработана новая математическая модель осаждения частиц во вращающемся потоке в цилиндрической части циклона, в которой учитывается турбулентный режим движения газа и которая позволяет находить параметры циклона заданной технической эффективности. Математическая модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений.

2. Разработан численный метод решения полученной системы дифференциальных уравнений, описывающих осаждение частиц в циклоне.

3. Произведен численный расчет поля скорости в цилиндрической части циклона и гидравлических потерь в циклонах.

4. Разработана методика определения характеристик пыли с различными механическими и геометрическими параметрами для расчета ее движения внутри циклона.

5. Разработаны рекомендации по улучшению конструкций циклона с целью повышения их энергетической эффективности.

6. Разработаны практические методы расчета технической эффективности циклона и рекомендации по выбору конструкции и размеров циклонов заданных производительности и технической эффективности для частиц с заданными параметрами.

Научная новизна представленной работы состоит в следующем.

1. Предложена математическая модель осаждения частиц в циклоне, учитывающая влияние поля тангенциальной скорости и турбулентности на техническую эффективность циклона.

2. Обобщены численные решения дифференциальных уравнений, описывающих осаждение частиц пыли, и разработаны номограммы для расчета осаждения.

3. Предложено рассчитывать противоточные циклоны с использованием в качестве основной характеристики частиц пыли, подлежащих удалению, их гравитационной гидравлической крупности.

4. Проведен анализ трехмерного поля скорости внутри противоточного

циклона и предложено усовершенствование его конструкции.

Достоверность результатов определяется тем, что теоретические и численные исследования основываются на использовании хорошо апробированных теорий и методов расчета технической механики жидкости. Численное моделирование выполнено с использованием лицензионного программного продукта Flow 3D. Экспериментальные результаты получены по известным методикам с оценкой погрешности измерений и удовлетворительно согласуются с теоретическими результатами автора. Результаты расчета, проведенного по предложенной методике, согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами других исследователей.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

- рекомендаций по улучшению конструкций циклона,
- рекомендаций по повышению энергетической эффективности циклона при заданной технической эффективности,
- рекомендаций по практическому определению характеристик пыли, необходимых для расчета циклона.

Личное участие автора заключается в разработке математической модели осаждения частиц в циклоне, численном решении полученных дифференциальных уравнений, проведении экспериментальных исследований гидравлической крупности частиц, разработке рекомендаций по расчету циклона и предложениях по усовершенствованию его конструкции.

На защиту выносятся:

- 1) математическая модель расчета осаждения частиц в циклоне и анализ результатов расчета;
- 2) применение в расчете циклона гидравлической крупности как основной характеристики частиц пыли;
- 3) метод расчета технической эффективности циклона и рекомендации по выбору его конструкции.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях:

- 1) 67-я Научная конференция профессоров, преподавателей, научных

работников, инженеров и аспирантов университета, ГОУ «СПбГАСУ», Санкт-Петербург, 2010;

2) XXXVIII Неделя науки СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2009;

3) Научные чтения «Вентиляция общественных и промышленных зданий», Санкт-Петербург, 2008;

4) Политехнический симпозиум, Санкт-Петербург, 2009.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 14 трудах, опубликованных в открытой печати. Из них 1 статья в журнале, рекомендуемом ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Работа содержит 102 страницы текста, 10 таблиц, 48 рисунков, список источников из 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложена актуальность диссертации, современный уровень развития циклонов для очистки газов от пыли, сформулированы цели исследования.

В первой главе освещены проблемы загрязнения воздушной среды, их актуальность и пути решения. Рассмотрены различные типы циклонов, являющихся одним из наиболее эффективных пылеуловителей, в особенности на стадии предварительной очистки. Опыт эксплуатации циклонов показывает, что они обеспечивают более высокую степень очистки при меньших энергетических затратах в сравнении с другими пылеулавливающими устройствами (например, с фильтрами).

Рассмотрены основные конструкции циклонов, в качестве объекта исследования выбран противоточный циклон с тангенциальным подводом воздуха. Проведен обзор литературных источников, посвященных исследованиям течения газа в циклонах. Теоретические основы описания процесса удаления пыли в циклонах были заложены в 40-х годах XX века такими исследователями как Б. Барс, А.Ю. Вальдберг, В.А. Дрозов, П.А. Коузов, Е. Лепл, Д. Лейтс, Д. Литч, А.И. Пирумов, В.Н. Ужов, Б.С.Федоров, С. Шеферд. Основные научные результаты в создании методик расчета эффективности пылеудаления в циклонах получены

В.А. Дроздовым, К. Риетемой, К. М. Розиным, Е.А. Штокманом, М.И. Шилиевым, Д. Стейтоном, Е. Леплом, Д. Литчем, С. Шефердом, Б. Барсом. Научные достижения в исследовании движения частиц в закрученных потоках жидкости и газа получены в ГОУ СПбГПУ А.В. Тананаевым, А.И. Буровым, Н.И. Ватиным. Большое значение имеют и исследования характеристик взвешенных частиц, физическое моделирование их свойств. Важные результаты в этой области получены А.М. Михалевым, Г.Т. Трунковым. Большое внимание в своей научной и технической деятельности вопросам очистки воздуха уделяют Н.З. Битколов, А.М. Гримитлин, Г.Я. Крупкин, Г.А. Смирнова. Особый интерес представляют результаты, полученные М.И. Шилиевым и его научной группой, по созданию методики оценки эффективности циклонов и математического принципа энергетического сравнения циклонов. В области численного моделирования процессов в циклоне отметим исследования Д. Деркесена и Х. Аккера.

Определены основные характеристики противоточных циклонов. Работу циклона в имеющихся публикациях оценивают по значению по его эффективности. Общую эффективность циклона будем определять по показателям технической, энергетической и экономической эффективности.

Технической эффективностью циклона будем называть степень очистки воздуха от пыли. Техническая эффективность выражается в процентах: $E_{\text{тех}} = \left(\frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \right) 100\%$. Здесь $C_{\text{вх}}$ – концентрация пыли на входе в циклон, мг/м^3 , $C_{\text{вых}}$ – концентрация пыли на выходе из циклона, мг/м^3 . Проведен критический обзор методик расчета эффективности пылеудаления в циклонах. Имеющиеся теоретические методы расчета не всегда позволяют оценить параметры частиц пыли и влияние турбулентности на процесс пылеудаления, в то время как экспериментальное уточнение и доводка методик трудны и дорогостоящи. Большинство методик основано на рассмотрении баланса сил, действующих на частицу, определении скорости радиального смещения частицы к стенке циклона и минимального диаметра частиц, которые осядут в циклоне.

При расчете эффективности пылеулавливания частицы характеризуются эквивалентным диаметром, значение которого разные исследователи устанавливают по-разному. Значение эквивалентного диаметра используется для вычисления скорости осаждения частиц на стенки циклона. При использовании

эквивалентного диаметра в расчете могут возникнуть некоторые неточности, связанные с завышенным значением принятого диаметра или несоответствующим действительности значением расчетной плотности частицы. Так, например, форма и плотность частиц для деревообрабатывающих цехов и текстильного производства сильно отличаются от аналогичных параметров пыли в механосборочных цехах. В некоторых случаях частицы пыли, предназначенные для удаления, являются горящими металлическими опилками, для которых геометрические размеры определить практически невозможно.

Теоретически и экспериментально не изучено распределение тангенциальной скорости в цилиндрической части циклона и его влияние на эффективность пылеудаления.

Учет турбулентного рассеивания, как правило, проводится косвенным методом. Влияние частоты и интенсивности турбулентных пульсаций потока на осаждение частиц, особо существенное при улавливании мелкодисперсных частиц, зачастую не оценивается.

На основании критического обзора были сформулированы цели и задачи работы, представленные в начале автореферата.

Во второй главе приведены теоретические исследования процесса удаления частиц в циклоне. Газ рассматривается как вязкая несжимаемая ньютоновская жидкость. Предлагается математическая модель осаждения частиц в циклоне, основанная на адаптации модели турбулентной диффузии с конечной скоростью. При этом в качестве параметров, характеризующих турбулентное рассеивание твердых частиц, используется не коэффициент турбулентной диффузии, а пульсационная скорость движения объемов газа, переносящих частицы, и характерная частота пульсаций скорости. Модель диффузии с конечной скоростью для гравитационного осаждения частиц верифицирована путем сопоставления результатов численного решения дифференциальных уравнений с опытными данными. Верификация модели для задач, в которых рассматривается осаждение частиц в турбулентном потоке для случая гравитационного осаждения, ранее была выполнена А.Д. Гиргидовым.

Рассматривается плоская задача о переносе частиц пыли в плоскости, перпендикулярной оси вращения потока. Все переменные считаются функциями

радиуса r и азимута ε . Абсолютное движение частиц складывается из переносного и относительного движения. Переносное движение частицы происходит в результате переноса частицы элементарными объемами газа, эти объемы участвуют в движении с осредненной скоростью u_ε (по concentрическим окружностям) и радиальными пульсационными скоростями.

Согласно простейшей нетривиальной модели турбулентной диффузии с конечной скоростью, пульсационная скорость принимает попеременно через случайные промежутки времени два характерных значения u_r'' и $-u_r''$, ω^L – характерная частота изменения объемами газа своей скорости. По аналогии с моделью турбулентной диффузии с конечной скорости для гравитационного осаждения частиц, разделим элементарные объемы газа и частицы, которые в них содержатся, на два сорта. Радиальная пульсационная скорость объемов и частиц «первого» сорта направлена от оси вращения, «второго» сорта – в сторону оси вращения.

Относительное движение частиц обусловлено отличием плотности частиц от плотности газа и их инерцией. Скорость $w_{цб}$ относительного движения направлена по радиусу.

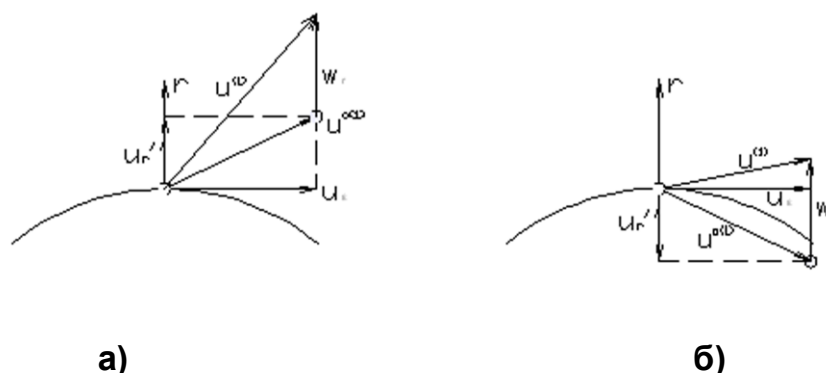


Рис. 1. Возможные абсолютные скорости движения частиц «первого» (а) и «второго» (б) сорта

Абсолютные скорости движения частиц «первого» и «второго» сортов, соответственно $u^{(1)}$ и $u^{(2)}$, представляют собой сумму переносной и относительной скоростей (рис. 1). Эти скорости будем называть возможными скоростями, т.к. движение частиц с другими скоростями не допускается. На основе модели получены дифференциальные уравнения, описывающие движение твердых частиц в закрученном потоке и их осаждение на стенки циклона:

$$\left. \begin{aligned} u_r^1 \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\varepsilon^1 \mathcal{G}_1 r)}{\partial \varepsilon} &= \omega^L (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1), \\ u_r^2 \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\varepsilon^2 \mathcal{G}_2 r)}{\partial \varepsilon} &= \omega^L (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Распределение тангенциальной скорости по радиусу было принято линейным, а интенсивность турбулентности $c = \sqrt{u^2} / u_\varepsilon$ была принята равной $c = 0,1$ по результатам выполненного автором численного моделирования турбулентного потока с использованием пакета программ Flow 3 D. Частота пульсаций ω^L постоянной по радиусу и по высоте цилиндрической части циклона:

$$\omega^L = k_\omega \frac{cv}{(R - r_0)}. \quad (2)$$

где v - скорость воздуха на входе в циклон, k_ω - коэффициент пропорциональности, задаваемый так, чтобы функция плотности распределения частиц имела один максимум, а функция массы выпавших частиц была монотонной.

Автором предложено рассчитывать относительную скорость по гидравлической крупности w . Эта величина интегрально учитывает различные факторы: размер и форму частиц, вязкость газа, относительную плотность частиц и др. Значение гидравлической крупности определяется теоретически или экспериментально.

Гидравлическую крупность частиц можно получить, приравняв разность силы тяжести и архимедовой силы значению силы лобового сопротивления при равномерном падении частицы со скоростью w .

Для мелких частиц, имеющих шарообразную форму с диаметром d и плотность ρ_q (например для частиц воды в воздухе) в случае, если число Рейнольдса

$Re_d < 10$, где $Re_d = \frac{wd}{\nu}$, где d - диаметр частиц, когда справедлива формула

Стокса, гидравлическая крупность можно найти теоретически:

$$w = \frac{1}{18} \frac{\rho_q - \rho_{жс}}{\rho_{жс}} \frac{d^2}{\nu} g, \quad (3)$$

В остальных случаях гидравлическая крупность может быть определена только экспериментально.

Относительная скорость движения частицы в циклоне равна центробежной

гидравлической крупности $w_{цб}$, которая представляет собой скорость квазиравномерного движения частицы относительно переносящего ее объема газа вследствие инерции, проявляющейся при криволинейности траектории движения переносящего ее объема. В работе предлагается рассчитывать эту величину через гидравлическую крупность, предполагая, что величина $w_{цб}$ так же зависит от центростремительного ускорения $\frac{u_\varepsilon^2}{r}$, как гидравлическая крупность w от ускорения свободного падения g . При этом, центробежная гидравлическая

крупность для мелких частиц: $w_{цб} = w \frac{u_\varepsilon^2}{gr}$ и для крупных частиц: $w_{цб} = w \sqrt{\frac{u_\varepsilon^2 g}{r}}$.

Для предлагаемого метода расчета циклона, задача определения характерного геометрического размера (эквивалентного диаметра) необходима только для установления области сопротивления. Для практических целей оценки эффективности циклона важно удаление циклоном из газа мелких частиц, размер которых, как правило, соответствует стоксовой области сопротивления.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) реализовано в цилиндрической системе координат $r - \varepsilon$, где r изменяется от r_0 до R (рис.2), а ε от 0 до значений, достигаемых при полном удалении примеси (рис. 3).

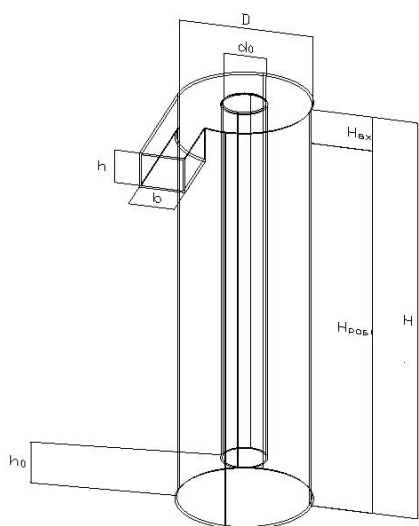


Рис. 2. Схема цилиндрической части циклона

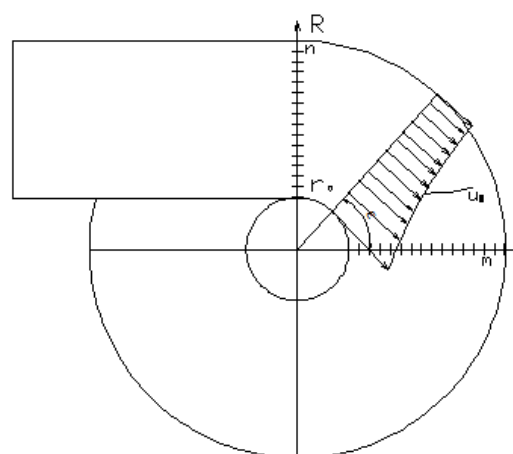


Рис. 3. Схематизация движения потока газа в циклоне

Сформулирована задача Коши с начальными и граничными условиями. Начальным условием при $\varepsilon=0$ является следующее: концентрация примеси на

входе в циклон \mathcal{G}_{ex} принимается равной концентрации пыли, поступающей в циклон \mathcal{G}_0 , частицы равномерно распределены между сортами, $\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_2 = \frac{\mathcal{G}_0}{2}$.
 Граничные условия: при $r = r_0$ поток примеси через твердую границу равен нулю, $\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_2 = 0$. При $r = R$ граничные условия не ставятся. Плотность выпадения частиц на стенки циклона при $r = R$ является искомой величиной. Степень очистки воздуха в зависимости от ε , равна разности начального потока Q_{s0} и потока $Q_s^{cm}(\varepsilon)$, выпавшего на внешнюю стенку при каждом шаге по ε .

В результате расчета можно построить зависимость технической эффективности E_{mex} от ε или от εR , что является длиной пути частиц до осаждения. Полученная зависимость позволяет вычислить длину пути частиц пыли в циклоне, при котором реализуется требуемая техническая эффективность. Зная длину пути частицы до осаждения, определяются основные геометрические характеристики цилиндрической части противоточного циклона.

В третьей главе представлены следующие разделы.

1. Результаты численного моделирования трехмерного турбулентного течения внутри циклона, которые в дальнейшем используются для расчета его технической эффективности. Для расчетов потока в циклоне использовался лицензионный прикладной пакет программ для численного моделирования турбулентных потоков Flow 3D. Расчет производился на основании $k - \varepsilon$ модели турбулентности. Расчет поля скорости и давлений был выполнен для семи различных вариантов конструктивных характеристик циклона и потока газа в нем (табл. 1).

Таблица 1. Расчет потока в циклоне

№ изм	$\frac{r_0}{R}$	$\frac{b}{h}$	$\frac{H_{ex}}{d_0}$	Подсоединение входного патрубка и крышки	$\frac{a}{d_0}$	$\frac{H}{H_0}$	Коническая часть
1.	0,3	>1	1,6	под углом 900	1	1	-
2.	0,4	1	1,6	под углом 900	$0,5d_{01}$	1	-
3.	0,5	<1	1,6	под углом 900	$0,5d_{01}$	1	-
4.	0,4	1	0	«направляющая крышка»	1	1	-
5.	0,4	1	1,6	под углом 900	3	1	-
6.	0,4	1	1,6	под углом 900	1	1	+
7.	0,4	1	1,6	под углом 900	1	2	-

При расчете на входе в циклон задана скорость 20 м/с, на выходе из выхлопной трубы задано атмосферное давление.

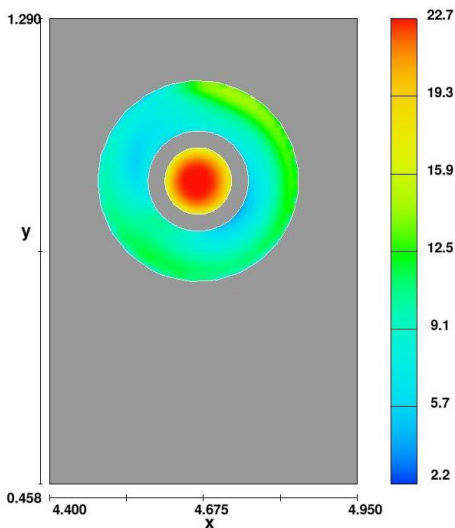


Рис. 4. Моделирование потока газа в циклоне. Поле скорости в потоке газа

значение u_{exp} пропорционально скорости на входе в циклон v :

$$u_{exp} = k_1 v, \quad (4)$$

где $k_1 = 0,4 - 0,6$.

Подтверждено, что в большей части потока внутри цилиндрической части циклона интенсивность турбулентности можно принять равной $c = 0,1$.

Определена высота входной (нерабочей) части циклона H_{ex} , на которой осесимметричный поток еще не сформировался и поэтому не происходит осаждения частиц в расчетном режиме. Эту величину H_{ex} предложено принять $H_{ex} = 1,6d_0$. Остальная часть циклона является рабочей (рис. 2).

Произведена оценка влияния конструктивных особенностей циклонов на гидравлическое сопротивление и их техническую эффективность.

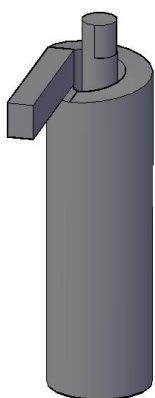


Рис. 5. Конструкция циклона с направляющей крышкой

Наименьшее значение гидравлического сопротивления достигается при следующем отношении диаметра циклона D к диаметру выхлопной трубы d_0 : $d_0 = 0,4D$. Установка «направляющей крышки» (рис. 5) способствует обеспечению заданной технической эффективности циклона на меньшей высоте.

Увеличение расстояния от нижней части выхлопной трубы до основания циклона h_0 (рис. 2), а также устройство конической прибункерной области способствуют уменьшению гидравлического сопротивления и увеличению технической эффективности циклона.

2. Экспериментальное исследование гидравлической крупности частиц, для отработки методики ее определения пригодной для производственных условий, было проведено для модельных и натуральных частиц пыли. В ходе эксперимента определялось время, за которое отдельная частица (выделяющаяся из источника загрязнения) под собственным весом пройдет фиксированное расстояние по вертикали.

В качестве модельных частиц использовалась мука, пудра, манная крупа. Полученные результаты для гравитационной гидравлической крупности модельных частиц приведены в табл. 2.

Таблица 2. Гравитационная гидравлическая крупность модельных частиц

w, м/с					
№ изм	для частиц пудры	№ изм	для частиц муки	№ изм	для частиц манной крупы
1	0,25	11	0,47	21	0,94
2	0,13	12	0,64	22	1,64
3	0,19	13	0,70	23	1,09
4	0,14	14	0,29	24	0,99
5	0,18	15	0,46	25	0,90
6	0,17	16	0,70	26	1,16
7	0,18	17	0,64	27	1,79
8	0,14	18	0,39	28	0,94
9	0,15	19	0,47	29	1,64
w_{cp}	0,15	w_{cp}	0,51	w_{cp}	1,5

В качестве натуральных частиц использовалась сварочная пыль. Задача определения гравитационной гидравлической крупности для подобных частиц особенно актуальна, т.к. при сварке выделяются горящие и раскаленные частицы, определить геометрические размеры которых сложно.



Рис. 6. Измерение гравитационной гидравлической крупности w частиц пыли, выделяющихся при сварочном производстве

Высота экспериментальной базы была принята 1,4 м, а высота поднятия источника загрязнения над экспериментальной базой, была больше длины релаксации для данного вида частиц и составила 1,35 м (рис. 6).

Результаты измерения гравитационной гидравлической крупности w для частиц сварочной пыли, полученные при натурном эксперименте, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Гравитационная гидравлическая крупность натуральных частиц

№ изм	w , м/с	№ изм	w , м/с	№ изм	w , м/с	№ изм	w , м/с	№ изм	w , м/с
1	6,25	11	4,38	21	4,00	31	3,83	41	2,95
2	3,75	12	5,50	22	4,69	32	4,25	42	3,50
3	6,00	13	4,00	23	5,00	33	5,00	43	5,83
4	4,50	14	3,75	24	5,08	34	4,75	44	4,38
5	3,50	15	4,25	25	4,64	35	4,25	45	3,94
6	3,61	16	4,25	26	5,17	36	4,75	46	5,13
7	5,42	17	4,00	27	4,06	37	3,50	47	4,93
8	4,06	18	3,75	28	3,38	38	5,75	48	4,06
9	3,75	19	4,00	29	3,45	39	4,25	49	3,72
10	3,89	20	4,25	30	3,30	40	3,75	50	6,64
w_{cp}	4,41	w_{cp}	4,21	w_{cp}	4,41	w_{cp}	4,57	w_{cp}	4,38

Методика определения гидравлической крупности w , описанная выше, представляется вполне реализуемой в производственных условиях и не требует специального оборудования и подготовки персонала для проведения опыта.

3. В результате обобщения расчетов осаждения частиц в циклоне, выполненных на основе модели турбулентной диффузии с конечной скоростью,

установлено, что техническая эффективность E_{mex} циклона не зависит от характерных значений частот пульсаций ω^L . Для крупных частиц E_{mex} мало зависит от интенсивности турбулентности c . Выявлено существенное влияние турбулентности на процесс осаждения мелких частиц (рис. 7). В некоторых случаях для обеспечения требуемой эффективности при фиксированных параметрах циклона, а также для обеспечения улавливания мелких частиц можно рекомендовать понижение интенсивности турбулентности. Это возможно осуществить путем, например, устройства конфузора на входе в циклон.

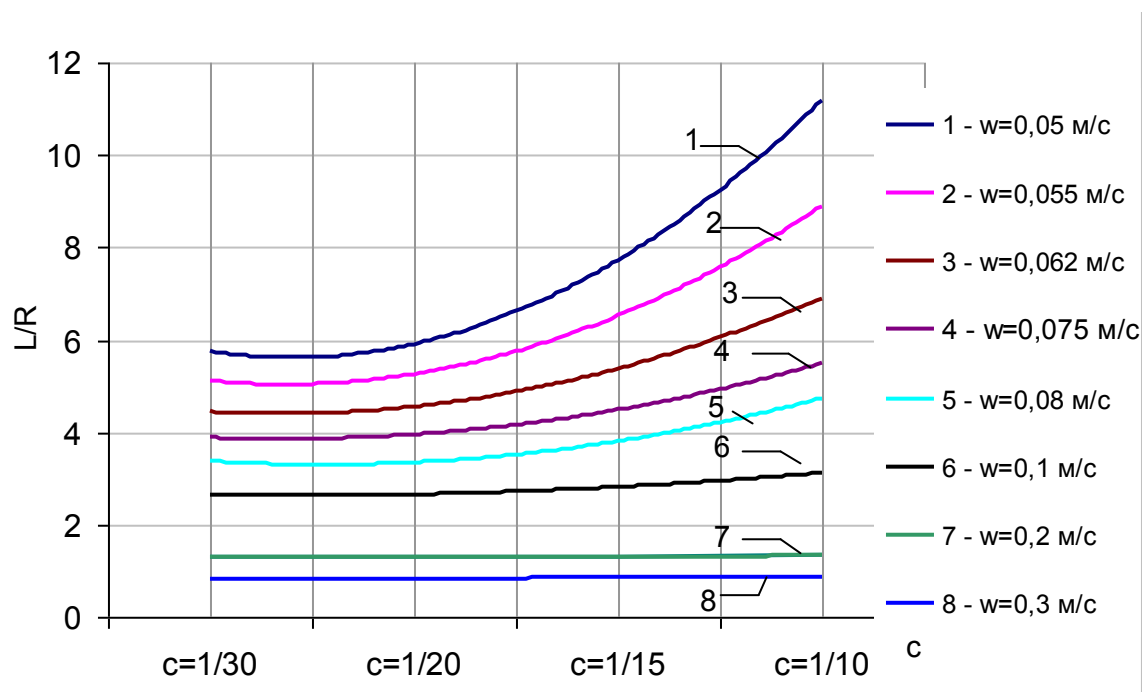


Рис. 7. Влияние турбулентных пульсаций на длину пути до осаждения частиц в циклоне заданной технической эффективности для частиц различной гидравлической крупности. Определено для скорости на входе в циклон $v_{\text{вк}} = 20 \text{ м/с}$, заданной эффективности $E_{mex} = 97\%$

Длина осаждения частиц в циклоне L (минимальный путь, проходимый по криволинейной траектории частицей от входа в циклон до осаждения на стенку) может быть определена как $L = L_{теор} k_2$, где $L_{теор}$ – расчетная условная длина осаждения частиц в циклоне, вычисленная при условии отсутствия турбулентности потока и изменения тангенциальной скорости u_ε , при центробежной крупности частиц $w_{цб}$, равной своему среднему значению на пути осаждения частиц:

$$L_{\text{теор}} = u_{\varepsilon} t = u_{\varepsilon} \frac{(R - r_0)}{w_{\text{цбср}}} = \frac{gQ}{2\pi v_x u_{\varepsilon} w}, \quad (5)$$

В этой формуле t – время, за которое частица достигнет стенки циклона, смещаясь только под действием центробежной силы; $w_{\text{цбср}}$ – среднее значение центробежной гидравлической крупности; v_x – средняя осевая скорость в циклоне; k_2 – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности, тангенциальной скорости и центробежной гидравлической крупности на техническую эффективность циклонов. Значение k_2 которого получено в результате расчетов по предложенной методике, и представлено графически (рис. 8).

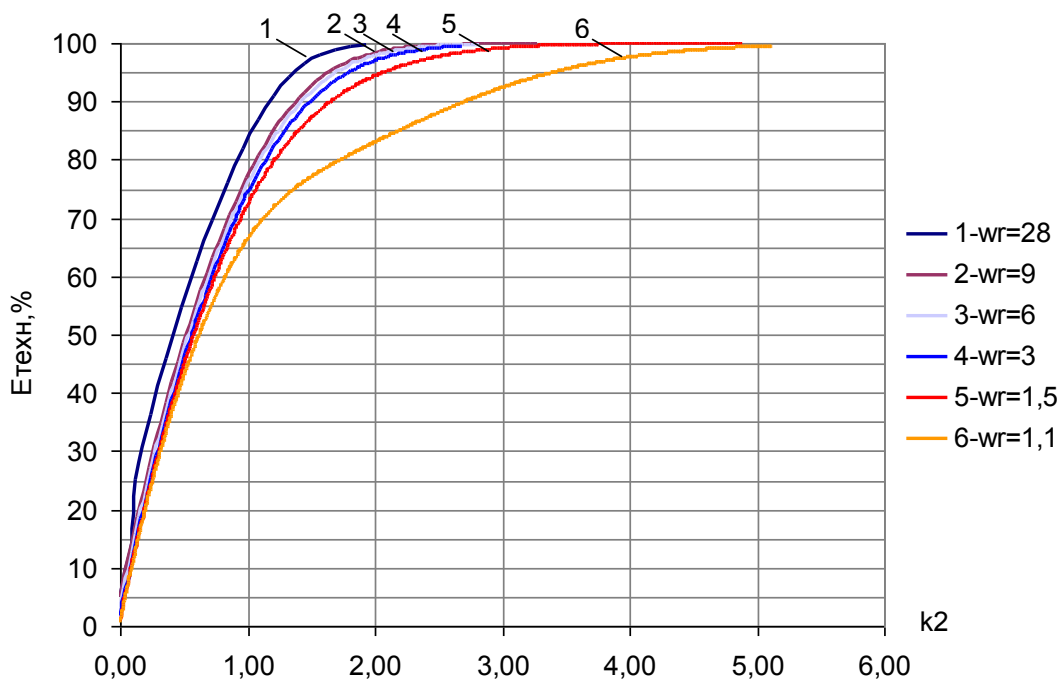


Рис. 8. Определение влияния турбулентных пульсаций на длину осаждения частиц в турбулентном потоке в циклоне

Безразмерная величина $w_r = \frac{2}{5} \frac{wk_1 v_{\varepsilon k}}{cgr_0}$ является относительной гидравлической

крупностью и характеризует отношение центробежной гидравлической крупности к радиальным пульсациям.

В четвертой главе приведены рекомендации по выбору конструкции и расчету циклона. Исходными данными для расчета циклона обычно являются:

- расход воздуха, который необходимо очистить, Q ;

- минимальный размер частиц, которые необходимо удалить;
- скорость воздуха на входе в циклон $v_{\text{ЭК}}$ которая на практике из соображений экономически целесообразного устройства сети промышленной вентиляции обычно составляет 20 м/с;
- соотношение радиуса цилиндрической части циклона и радиуса выхлопной трубы, для обеспечения наименьшего гидравлического сопротивления циклона обычно принимается равным $r_0 = 0,4R$;
- размер входного патрубка квадратного сечения обычно $b = \sqrt{\frac{Q}{v_{\text{ЭК}}}}$.

Автором рекомендуется следующая последовательность расчета для выбора и оценки циклона, обеспечивающего требуемую техническую эффективность.

1. Установить расчетное значение гравитационной гидравлической крупности частиц w (по таблицам, теоретически либо экспериментально, проведя необходимые опыты).

2. Определить радиус выхлопной трубы $r_0 = \sqrt{\frac{Q}{\pi v_{\text{ЭК}}}}$.

3. Вычислить радиус цилиндрической части циклона $R = 2,5r_0$.

4. Определить высоту входной части циклона H_{EX} . Согласно результатам экспериментального исследования составляет $H_{\text{EX}} = 1,6d_0$ (при отсутствии направляющей крышки), а для предложенной конструкции циклона с направляющей крышкой $H_{\text{EX}} = 0$.

5. Рассчитать высоту рабочей части циклона, на которой обеспечивается заданная эффективность, по полученной формуле:

$$H = H_{\text{EX}} + L \frac{v_x}{u_\varepsilon}, \quad (6)$$

где $u_\varepsilon = k_1 \cdot v_{\text{ЭК}}$ (4); L – длина осаждения частиц в циклоне: $L = L_{\text{теор}} k_2$; v_x – средняя осевая скорость в циклоне.

где $L_{\text{теор}}$ – расчетная длина осаждения частиц в циклоне, без учета турбулентности потока, изменения тангенциальной скорости u_ε и центробежной крупности частиц $w_{\text{цб}}$, определяется по формуле (5); k_2 – коэффициент, учитывающий влияние

турбулентности, тангенциальной скорости и центробежной гидравлической крупности на техническую эффективность циклонов, значение которого получено в результате расчетов по предложенной методике, и может быть определено графически (рис. 8).

6. Определить, с учетом (6) высоту цилиндрической части циклона по формуле:

$$H = H_{ex} + L_{meop} k_2 \frac{Q}{\pi(R^2 - r_0^2) k_1 v_{эк}}. \quad (7)$$

7. В случае, если учтены рекомендации по размерам циклона и величина коэффициента k_1 составляет $k_1 = 0,45$, и с учетом формулы (5), высота цилиндрической части циклона необходимая для обеспечения заданной технической эффективности можно определить:

$$H = H_{ex} + k_2 \frac{r_0^2 g}{0,9 w v_{эк}}.$$

8. Если результаты расчета приводят к необходимости изготовления циклона слишком большого размера и требуется подобрать циклон с использованием предложенной методики, для диаметра D (или диаметра выхлопной трубы d_0), находящегося в диапазоне, рекомендуемом нормами проектирования, расчет выполняется следующим образом. Необходимо:

- установить расчетное значение гравитационной гидравлической крупности частиц w (по таблицам, теоретически либо экспериментально, проведя необходимые опыты);
- задать радиус выхлопной трубы r_0 в диапазоне 0,1-0,5 м;
- определить радиус цилиндрической части циклона: $R = 2,5 r_0$.;
- входной патрубком принять квадратного сечения, с размерами $b = \sqrt{\pi} r_0$;
- определить расчетный расход для заданного циклона: $Q_{расч} = v_{эк} \pi r_0^2$;
- определить необходимое количество циклонов: $n = \frac{Q}{Q_{расч}}$;
- для каждого циклона определить длину рабочей части циклона, на которой обеспечивается заданная эффективность, и высоту цилиндрической части циклона, как было предложено в предыдущем

расчете.

В работе приведен пример расчета противоточного циклона по предложенной методике. Результаты расчета не противоречат результатам расчетов, полученных при использовании известных методик, а также позволяют точно определить минимальные размеры циклона для обеспечения заданной технической эффективности, т.к. проводятся с учетом влияния турбулентности потока газа на удаление мелкодисперсных частиц.

Основные результаты и выводы

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенная математическая модель осаждения частиц в циклоне, является эффективным средством расчета осаждения частиц в противоточном циклоне.

2. Показано, что для частиц, центробежная гидравлическая крупность которых незначительно больше радиальных пульсаций, реальная длина пути осаждения в циклоне, вычисленная с учетом турбулентности потока газа в циклоне, в 3-5 раз превышает расчетную длину осаждения частиц в циклоне, вычисленную без учета турбулентности. Для таких и более мелких частиц рекомендуется снижение интенсивности турбулентности в циклоне до 0,033...0,05.

3. Изменение тангенциальной скорости вдоль радиуса незначительно и не оказывает существенного влияния на эффективность пылеулавливания, поэтому в практических расчетах можно принять постоянное значение тангенциальной скорости, которое в 2-2,5 раза меньше значения заданной скорости на входе в циклон.

4. Показана целесообразность использования при расчете циклона в качестве гидромеханической характеристики пыли ее гидравлической крупности (вместо обычно используемого эффективного диаметра). Предложены методы определения значений этой величины для различных видов пыли в производственных условиях.

5. Установлено влияние конструктивных особенностей циклонов на их гидравлическое сопротивление и техническую эффективность. Наименьшее

значение гидравлического сопротивления достигается при отношении диаметра циклона D и диаметра выхлопной трубы $d_0 = 0,4D$. Устройство «направляющей крышки» позволяет уменьшить высоту входной части циклона и обеспечить заданную техническую эффективность при меньшей высоте, что является альтернативой устройства распределенного подвода воздуха в циклон.

6. Предложены практические рекомендации по расчету циклонов. Результаты работы внедрены в ЗАО «СовПлим» для расчета технической эффективности и оптимизации конструкций противоточных циклонов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих трудах.

Статьи в журналах, рекомендуемых Перечнем ВАК

1. Стрелец К. И. Численное решение уравнений турбулентной диффузии в закрученном потоке газа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – №5 (108). – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 156-160.

Публикации в других изданиях

2. Стрелец К. И. Методика расчета эффективности очистки воздуха // 67-я научная конференция профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета ГОУ СПбГАСУ: материалы конференции. – СПб. : Изд-во СПбГАСУ, 2010. С. 25–26.

3. Бабенко А. П. Особенности предварительной очистки газов с помощью механической очистки / А. П. Бабенко, А. А. Короткевич, К. И. Стрелец // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 259–262.

4. Стрелец К. И. Моделирование течений в пылеулавливающем оборудовании // Сборник тезисов научно-исследовательских работ студентов и аспирантов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 47–49.

5. Морозов И. А., Стрелец К. И. Воздухообмен в чистом помещении / И. А. Морозов, К. И. Стрелец // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч.1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 188–190.

6. Гиргидов А. А. Моделирование течений в пылеулавливающем оборудовании / А. А. Гиргидов, Н. И. Ватин, К. И. Стрелец // Вентиляция общественных и промышленных зданий: Материалы научных чтений, посвященных 80-ой годовщине со дня рождения д.т.н., профессора М.И. Гримитлина. 28 марта 2008 г., Санкт-Петербург. – СПб. : АВОК-Пресс, 2008. – С. 19–20.

7. Орлов И. В. Применение систем очистки воздуха в гражданском строительстве / И. В. Орлов, К. И. Стрелец // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 116–118.

8. Ватин Н. И. Очистка воздуха как важнейшее направление экотехники воздушной среды. Методика расчета и возможность повышения эффективности пылеулавливания аппаратов типа циклон Ч1 / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец // Инженерные системы. – 2005. – №3(19). – С. 58–66.

9. Ватин Н. И. Очистка воздуха как важнейшее направление экотехники воздушной среды. Методика расчета и возможность повышения эффективности пылеулавливания аппаратов типа циклон Ч2 / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец // Инженерные системы. – 2005. – №4(20). – С. 58–66.

10. Ватин Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Инженерно-строительный факультет, Кафедра технологии, организации и экономики строительства. – СПб.: Б.и., 2003.- 65 с.: ил.- Библиогр.

11. Стрелец К. И. Эффективность инерционных фильтров-сепараторов / К. И. Стрелец, А. В. Тананаев // Материалы международной научно-технической конференции «Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем». – СПб. : СПбОДЗПП, 2002. – С. 33–34.

12. Стрелец К. И. Очистка газовых потоков от твердых примесей при помощи инерционного фильтра сепаратора / К. И. Стрелец, А. А. Ковалев, Н. И. Ватин // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2002. – С.

123–124.

13. Стрелец К. И. Очистка промышленных газов / К. И. Стрелец, А. А. Милюкова, Н. И. Ватин // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 71-73.

14. Стрелец К. И. Очистка промышленных газов // Материалы политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности северо-западного региона». – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 36.