

На правах рукописи



Буров Артем Сергеевич

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО
ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОТОЧНОМ ЦИКЛОНЕ**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ» (КНИТУ - КАИ) на кафедре «Реактивные двигатели и энергетические установки».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Глебов Геннадий Александрович

Официальные оппоненты:

Николаев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет - КХТИ», кафедра «Оборудование пищевых производств», заведующий кафедрой

Кессель Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

Ведущая организация:

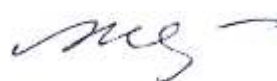
Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии», г. Казань

Защита состоится “15” июня 2016 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ» по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» и на сайте <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан “11” апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Закрученные двухфазные течения нашли широкое применение в технике, а в частности в циклонах для очистки газового потока от механических и жидких частиц применяемых для золоулавливания от энергетических котлов ТЭЦ, улавливания частиц урановой пыли при его добыче, очистки продуктов сгорания при утилизации РДТТ и др.

По исследованию двухфазных течений в циклонах в настоящее время известно большое количество экспериментальных работ, однако они выполнены для конкретных размеров устройств и обобщение полученных экспериментальных данных на другие размеры и геометрию с использованием методов анализа размерностей и теории подобия весьма затруднительно. Известные методы расчета турбулентных двухфазных течений в циклонах носят приближенный эмпирический характер. Обзор научно-технической литературы показал, что надежные методы проектирования циклонов в настоящее время отсутствуют.

В последнее время, достигнут существенный прогресс в области численного моделирования турбулентных двухфазных течений, поэтому разработка и применение данных методов при проектировании циклонов представляется весьма актуальным.

Цель диссертационной работы. На основе численного моделирования и сравнения с экспериментальными результатами получить надежный метод расчета газодинамических процессов и основных параметров, необходимых при проектировании прямоточных циклонов.

Основные задачи диссертационной работы:

- На основе сравнения с экспериментом выбрать метод и модель расчета турбулентного двухфазного течения в прямоточном циклоне;
- Численно исследовать структуру течения и влияние физических параметров, таких как геометрия проточной части, степень закрутки потока, размер и форма механических частиц и др. на основные характеристики циклона;
- Показать точность и надежность выбранной методики расчета для определения основных параметров (степень очистки, гидравлическое сопротивление и др.) при проектировании прямоточных циклонов.

Объект исследования – двухфазное закрученное течение газа и частиц примеси в тракте прямоточного циклона.

Предмет исследования – прямоточный циклон.

Методы исследования.

- Численный метод на основе решения системы уравнений Навье-Стокса усредненных по Рейнольдсу.
- Экспериментальное исследование на аэродинамической трубе, работающей на отсасывание.

Достоверность полученных результатов подтверждается и обеспечивается использованием верифицированных и всемирно признанных численных методов расчета течений, использованием измерительной аппаратуры, прошедшей метрологическую поверку, удовлетворительным согласованием полученных данных с экспериментальными и расчетными результатами других авторов.

Научная новизна:

1. В рамках численного метода на основе решения уравнений Навье-Стокса получены новые данные о структуре двухфазного течения в прямоточном циклоне:

- положение максимума тангенциальной и осевой скоростей;
- обнаружен предотрыв газового потока от спинок лопаток завихрителя, однако он никак не повлиял на движение твердых частиц;
- показано отставание по скорости частиц различных размеров и формы от газа по мере движения по тракту прямоточного циклона;

3. Установлено существенное влияние формы частиц на эффективность очистки, которое наиболее проявляется для частиц малых размеров;

4. На основе расчетов и экспериментов показана целесообразность применения прямоточного циклона по схеме с рециркуляцией газа из бункера в приосевую зону завихрителя;

5. Показано влияние на основные параметры прямоточного циклона, а именно эффективность очистки (η) и гидравлическое сопротивление (ζ) таких факторов как: геометрические размеры циклона, степень закрутки потока, давление газа, расход смеси и концентрация частиц, а также отставание по скорости частиц от газа на входе в завихритель.

6. Предложена методика определения наименьшего диаметра частиц, который способен отделить прямоточный циклон. Установлено, что сепарация единичной частицы зависит от ее радиальной координаты на входе в завихритель.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты могут быть использованы в различных отраслях промышленности при проектировании прямоточных циклонов. Научная и практическая значимость подтверждена актом об использовании результатов диссертационной работы в ООО «НПП «Авиагаз-Союз+».

Положения, выносимые на защиту

- Анализ моделей турбулентности для расчета закрученного течения в прямоточном циклоне;
- Численное исследование структуры течения в прямоточном циклоне с учетом влияния частиц примеси;
- Влияние на газодинамику, эффективность очистки и параметры прямоточного циклона следующих факторов:
 - диаметра вихревой трубы и других геометрических параметров;
 - размера и формы частиц;
 - степени закрутки потока;
 - плотности газа;
 - разности скоростей частиц примеси и газа на входе в завихритель.
- Влияние рециркуляции газа из бункера сбора примеси в приосевую зону завихрителя на рабочий процесс в циклоне;
- Обоснование применения численного метода для определения оптимальных параметров циклона.

Личный вклад автора. Определен алгоритм и основные нюансы численного моделирования работы прямоточного циклона с применением пакета ANSYS Fluent. Проведено численное исследование прямоточного

циклона. Выполнено обобщение полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными в виде таблиц и графиков.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались:

- на III Международной научно-практической конференции в Казанском научно-исследовательском институте авиационной технологии по тематике “Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения” (ИТМ-2008), 17-19 сентября в 2008г.;

- на XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции в Казанском высшем военном командном училище по тематике “Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий”, 12-14 мая в 2009г.;

- на XXXXII Всероссийском симпозиуме в Межрегиональном совете по науке и технологиям, г. Миасс Челябинской обл. по тематике «Механика и процессы управления», 18-20 декабря в 2012 г.;

- на XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева в Межрегиональном совете по науке и технологиям, г. Миасс Челябинской обл. по тематике «Наука и технологии», 10-12 июня в 2014 г.;

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ. Из них: два тезиса доклада Всероссийской научно-технической и Международной научно-практической конференции; две статьи в сборниках Всероссийского симпозиума и Всероссийской конференции; глава в коллективной монографии; две статьи в рекомендуемом ВАК журнале.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка используемых источников из 104 наименований, изложена на 118 листах машинописного текста и содержит 59 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертационной работы.

В первой главе показана необходимость применения в современной промышленности различных устройств для очистки газов и жидкостей от примеси.

На основе научно технической литературы, патентов и других источников авторов: Идельчик И.Е., Сугак А., Щукин В.К., Халатов А.А., Ветошкин А.Г., Штокман Е.А., Бакланов Г.М., Банит Ф.Г., Алиев Г.М., Абросимов Ю.В., Кессель Б.А., Кныш Ю.А., Лукачев С.В., Хазбулатов А.И., Глебов Г.А., Швыдкий В.С., Гордон Г.М., Русланов А.А., Вальдберг А.Ю., Чохонелидзе А.Н., и многих других дан обзор методов и различных технических решений очистки газов от взвешенных в них частиц. Особое внимание уделено прямоточным циклонам.

Рассмотрены известные методы расчета подобных устройств. Более детально представлены методики расчета Василевского М.В., Страуса В. и др.

Показаны возможности современных пакетов численного моделирования турбулентных двухфазных потоков.

Проведенный обзор показал, что, несмотря на широкое распространение циклонов, отсутствуют четкие рекомендации для их проектирования. Отсутствуют в полном объеме данные по структуре течения в подобных устройствах. Кроме того, влияние различных факторов и параметров на эффективность очистки мало изучено. Сформулированы преимущества выбранной схемы сепаратора и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описан численный метод расчета одно и двухфазных течений, используемый в современных пакетах численного моделирования. Даны: Общие сведения о численных методах, о моделировании турбулентности; краткое описание моделей турбулентности являющихся наиболее часто используемыми и наиболее перспективными; моделирование движения второй фазы (примеси). Подробно описана модель турбулентности RNG, используемая в исследовании.

В третьей главе описана расчетная схема и экспериментальный стенд, который представлял собой малую аэродинамическую трубу, работающую на отсасывание. Схема рабочего участка исследуемого сепаратора приведена на рисунке 1. На рисунке 2 представлена фотография экспериментального циклона. В его состав входят: завихритель 1, вихревая труба, диаметром 80 мм 2, патрубок отвода очищенного газа 3, бункер сбора частиц 4, труба рециркуляции аэрозоля из бункера на вход сепаратора 5, кран 6 для перекрытия трубы 5, питатель-дозатор частиц в воздушный поток 7.

В качестве газовой фазы использовался воздух комнатной температуры. частицы твердой фазы приведены в Таблице 1. Дисперсный состав примесей определен в результате просеивания веществ на ситах с разным размером сеток. Для подачи частиц использовались оригинальные устройства, разработанные Хазбулатовым А.И.

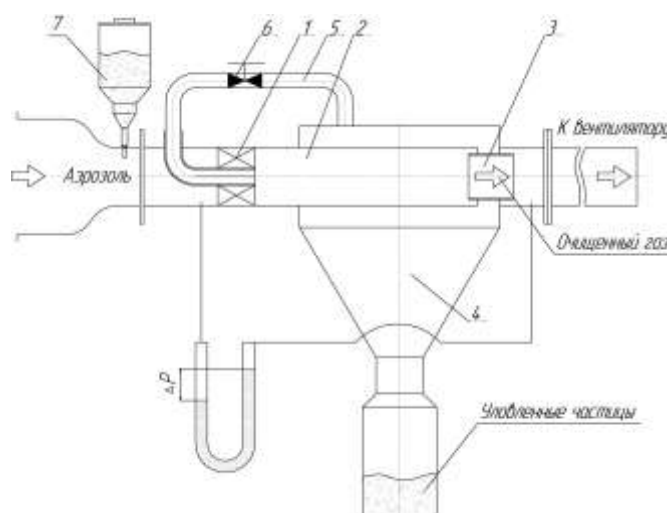


Рисунок 1. Схема рабочего участка исследуемого циклона

Таблица 1 – Дисперсный состав механической примеси

$d_{4,3} = 9$ мкм (Микротальк)		$d_{4,3} = 128$ мкм (Смесь речного песка, молотого камня и Al_2O_3)	
Размеры частиц, мкм	Массовая доля, %	Размеры частиц, мкм	Массовая доля, %
0 – 5	40	1 – 26	5,77
5 – 10	30	26 – 40	7,69
10 – 20	20	40 – 64	9,62
20 – 25	10	64 – 94	11,54
-	-	94 – 125	13,46
-	-	125 – 160	15,38
-	-	160 – 200	17,31
-	-	200 – 250	19,23

Описан принцип работы прямоточного циклона, основанный на отбрасывании жидких или твердых частиц под действием центробежных сил к стенке вихревой трубы и вывод их в бункер через сепарационную щель.

На основе анализа технической литературы для закрутки потока выбран аксиальный лопаточный завихритель 1, который имел 8 спрофилированных лопаток, установленных под углом 45° . Перепад давления на циклоне в экспериментах изменялся в пределах 400 - 1200 Па. Число Рейнольдса, вычисленное по среднерасходной скорости и диаметру вихревой трубы, при указанном ΔP составило $3 - 6 \cdot 10^4$, что соответствует турбулентному режиму течения. Концентрация вводимых в поток частиц была в диапазоне $0,4 - 4 \text{ г/м}^3$. Наибольшее значение соответствует пылевой буре в атмосфере Земли.



Рисунок 2. Экспериментальный циклон

Численное моделирование проводилось с помощью программного пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent при следующих допущениях: течение – стационарное; частицы подавались равномерно по всей площади входа; взаимодействие частиц между собой не учитывалось; задавалось условие отскока частиц от стенок; температура газа и частиц на входе в циклон $\sim 300 \text{ К}$; теплообмен между газом и стенками, а так же между газом и частицами отсутствовал.

В четвертой главе приводятся результаты численного исследования и сравнение с экспериментом.

Выбор модели турбулентности. Для сравнения различных моделей турбулентности и выбора оптимальной модели проведены расчеты однофазного течения в исследуемом устройстве с использованием моделей RSM, RSM-k-w, RNG, Realizable, k-w.

На Рисунке 3 представлены расчетные профили тангенциальных и аксиальных скоростей ($\bar{v} = \frac{r}{R}$, где r – текущий радиус, R – радиус вихревой трубы, $\bar{x} = \frac{x}{D}$, где x – расстояние от завихрителя, D – диаметр вихревой трубы).

На профилях скоростей хорошо виден резкий излом - провал скорости на небольшом расстоянии от стенки ($\bar{v} = 0,9$). Он объясняется наличием предотрыва потока с наружной стенки лопаток завихрителя.

Представленные зависимости говорят о хорошей корреляции результатов, полученных на разных моделях турбулентности. Различия расчетных данных находятся на уровне погрешности численного метода.

На Рисунке 4 представлены расчетные данные по энергии турбулентности на оси циклона в различных его сечениях \bar{x} . Видно, что модели турбулентности $k-w$, RNG , $Realizable$ дают близкие результаты по величине энергии турбулентности. В технической литературе удалось найти экспериментальные данные только по турбулентным характеристикам в свободных закрученных струях и

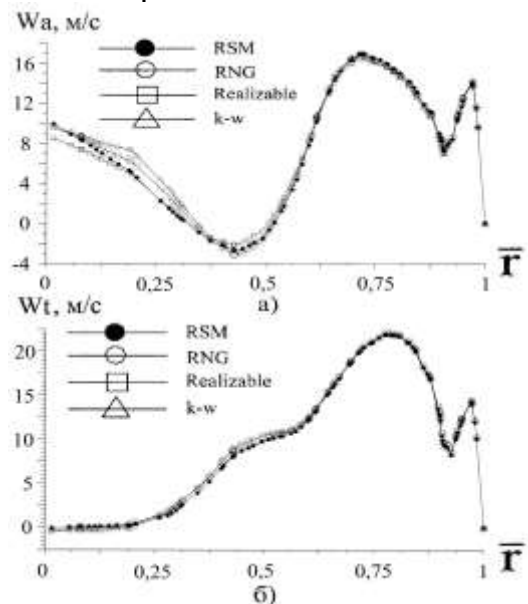


Рисунок 3. Профили аксиальной (а) и тангенциальной (б) скоростей ($\bar{x} = 0,05$)

круглом канале: $\frac{\sqrt{k}}{u} \approx 16 - 25\%$

[А. Гупта], [А.А. Халатов]. Если предположить, что на оси закрученной струи в канале характеристики турбулентности мало отличаются от свободной струи, то модели турбулентности *k-w*, *RNG*, *Realizable* дают удовлетворительное согласование с экспериментом.

Для дальнейшего исследования выбрана модель турбулентности *RNG*. Метод решения уравнений – SIMPLE.

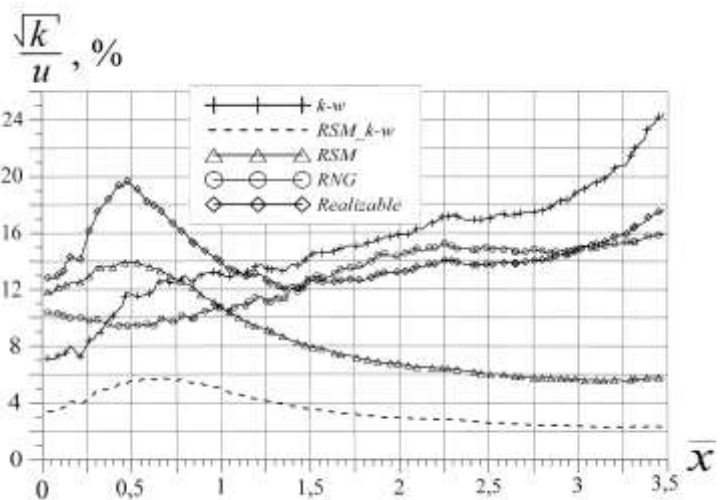


Рисунок 4. Профиль энергии турбулентности вдоль оси циклона

Влияние формы частиц на эффективность очистки циклона. В качестве основной характеристики для сравнения расчета и эксперимента была выбрана величина эффективности очистки $\eta = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%$, где m_0 – масса частиц в газе до очистки, m_1 – масса частиц в газе после очистки. Эффективность очистки в эксперименте определялась с погрешностью $\leq 1\%$. В расчетах задавался расход газа, равный экспериментальному значению, а форма частиц – круглая. Результаты расчета в сравнении с экспериментом представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение численного моделирования и результатов эксперимента

Среднемассовый диаметр в распределении, d_{43} , мкм	η , %, эксперимент	η , %, численное моделирование
9	74	89
128	97	98,15

Из Таблицы 2 видно, что для частиц $d_{43} = 128$ мкм результаты расчета и эксперимента практически совпадают, а для более мелких частиц талька со среднемассовым диаметром $d_{43} = 9$ мкм данные численного моделирования расходятся с экспериментальными данными. Анализ уравнения движения частиц показал, что процесс сепарации частиц зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления C_D , который, в свою очередь, зависит от коэффициента формы частицы – $\phi = \frac{s}{S}$, где s – площадь поверхности сферы того же объема, что и рассматриваемая частица, S – площадь поверхности рассматриваемой частицы. Зависимость $C_D \approx f(Re, \phi)$, взятая из работы Р. Бусроида приведена на рисунке 5, по ней видно, что коэффициент аэродинамического сопротивления различных частиц может отличаться от сферических в десятки раз.

При рассмотрении частиц талька под микроскопом оказалось, что их форма далека от сферической и напоминает чешуйки. Оценка коэффициента формы (несферичности) частиц показала, что он соответствует значению $\phi \approx 0,25$.

Этим объясняется разница экспериментальных и расчетных данных.

На рисунке 6 представлены результаты расчета эффективности очистки от коэффициента формы частиц в пределах 0,25 – 1. Видно, что для крупных частиц форма слабо влияет на эффективность очистки, а для мелких влияние существенно.

Сопоставление результатов расчета с экспериментом по влиянию размера и формы частиц представленное на рисунке 7 показало удовлетворительное соответствие.

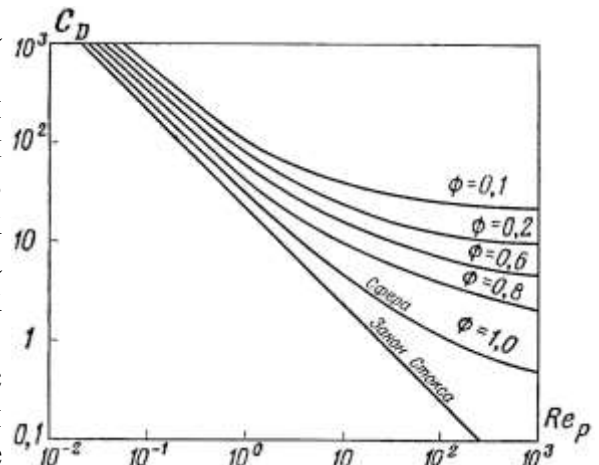


Рисунок 5. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса для частиц несферической формы.

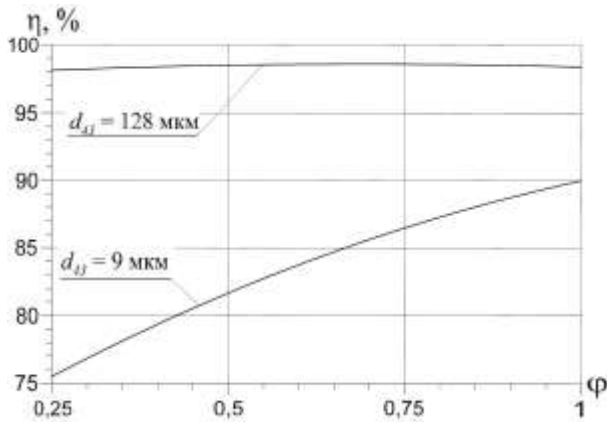


Рисунок 6. Влияние формы и размера частиц на эффективность очистки циклона

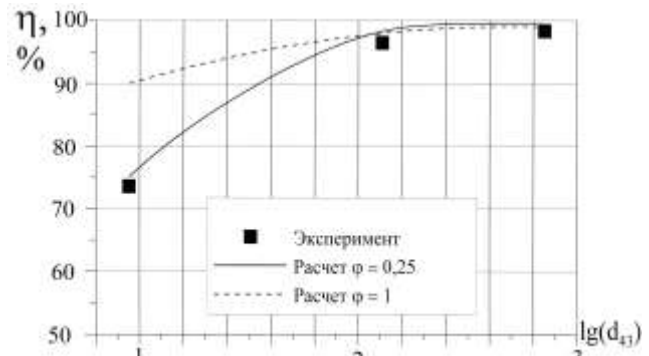


Рисунок 7. Сравнение расчета и эксперимента

Влияние концентрации примеси и перепада давления на сепараторе. В Таблице 3 представлены результаты численного исследования влияния концентрации примеси на эффективность очистки $\eta, \%$ для частиц микроталька $d_{43} = 9$ мкм при $\Delta P \sim 800$ Па.

Таблица 3 – Влияние концентрации примеси на эффективность очистки циклона

Концентрация частиц, мг/м ³	430	700	1920	3850
$\eta, \%$	75,4	75,2	75,3	75,5

Оказалось, что в исследуемом диапазоне концентраций эффективность очистки практически не зависит от концентрации частиц в газе.

При проектировании циклонов важно определить не только его конструктивные параметры, но и правильно выбрать величину расхода двухфазной смеси через его проточную часть. Увеличение расхода с одной стороны приводит к увеличению тангенциальной скорости и центробежной силы, действующей на частицы, а с другой – уменьшает время пребывания частицы в циклоне. Отметим так же, что увеличение расхода приводит к более интенсивному абразивному износу элементов циклона.

Расход смеси через циклон пропорционален $\approx \sqrt{\Delta P}$, где ΔP - перепад давления на циклоне. Средняя скорость через циклон изменялась в пределах 6 – 11 м/с, что соответствует изменению числа Рейнольдса от $3 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$.

Влияние ΔP на эффективность очистки $\eta, \%$ представлено на Рисунке 8.

Видно, что эффективность очистки $\eta, \%$ слабо зависит от величины ΔP , а, следовательно, и от расхода через циклон. Это указывает на возможность использования его в широком диапазоне по расходу газа.

Отметим, что аналогичный вывод был получен экспериментально в работе Хазбулатова А.И. при исследовании циклона с тангенциальным типом завихрителя.

Численные расчеты позволили получить поля концентрации в проточной части циклона и в бункере сбора частиц (рисунок 9). Видно, что наибольшая концентрация частиц располагается вблизи стенки циклона непосредственно перед кольцевой сепарационной щелью.

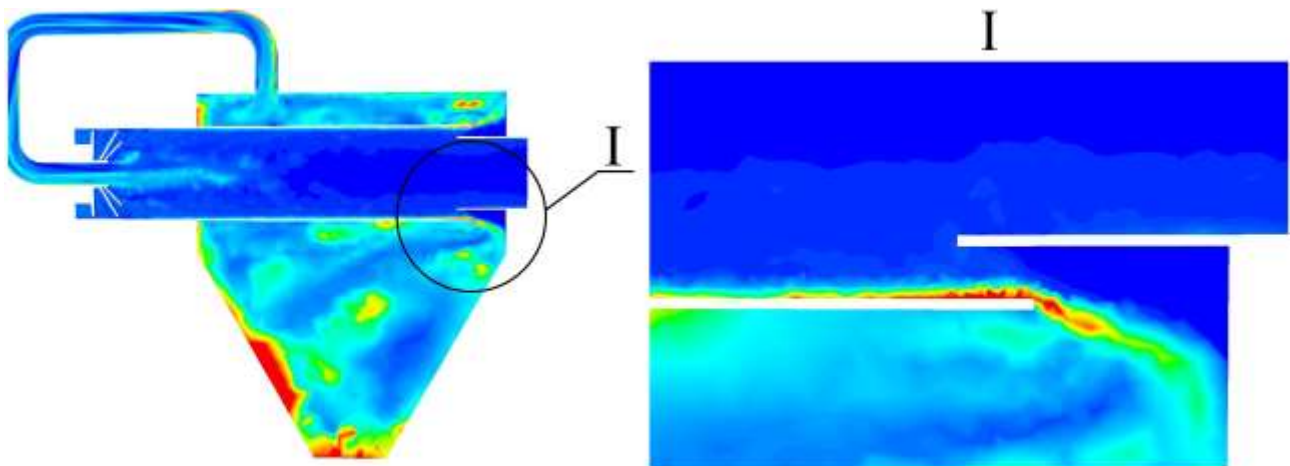


Рисунок 8. Влияние перепада давления на циклоне на эффективность очистки

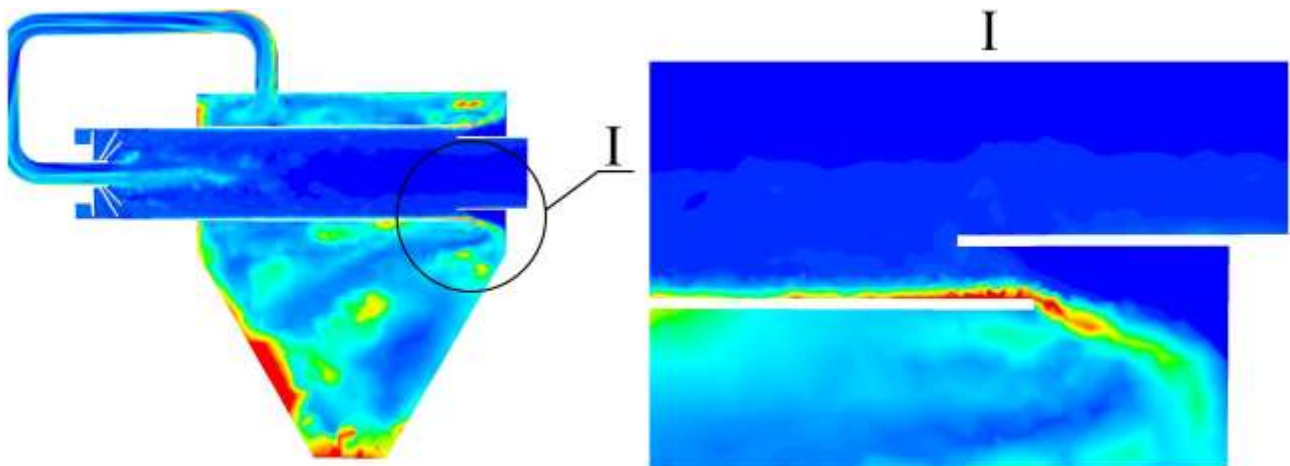


Рисунок 9. Распределение концентраций частиц $d_{43} = 9 \mu\text{м}$ в циклоне

На рисунке 10 (а, б) приведены поперечные профили концентраций частиц $d_{43} = 9 \mu\text{м}$ и $d_{43} = 128 \mu\text{м}$ в различных сечениях \bar{x} . По оси ординат отложена относительная концентрация $\bar{c} = \frac{C}{C_0}$, где C – локальная концентрация, C_0 – концентрация частиц на входе, а по оси абсцисс относительный радиус \bar{r} . Поля концентраций на рисунках внутри графиков соответствуют сечению $\bar{x} = 3,5$.

Как показали расчеты, по мере движения двухфазной смеси по тракту вихревой трубы твердые частицы устремляются к стенкам и их концентрация у периферии увеличивается в десятки раз. Необходимо отметить, что частицы с $d_{43} = 9 \mu\text{м}$ значительно более сильно прижимаются к стенкам циклона в отличие от частиц с $d_{43} = 128 \mu\text{м}$. Такой эффект можно объяснить отскоком крупных частиц от стенок вихревой трубы, поэтому «толщина» их слоя у стенки больше.

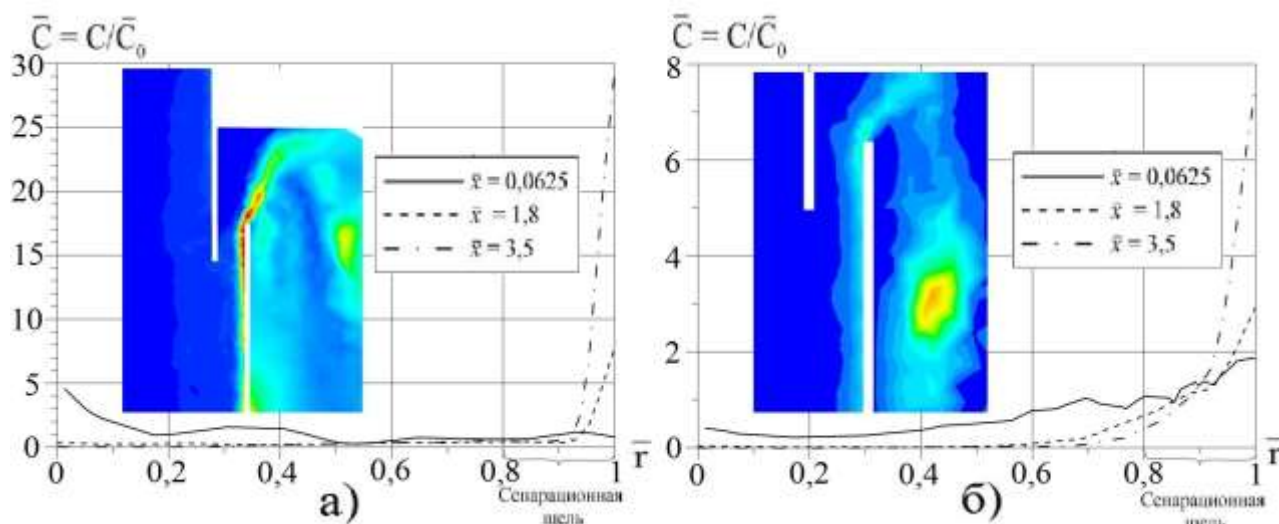


Рисунок 10. Профили концентрации частиц по длине и радиусу вихревой трубы циклона
а) $d_{43} = 9$ мкм, б) $d_{43} = 128$ мкм

Влияние рециркуляции газа из бункера сбора примеси в приосевую зону завихрителя циклона.

С целью исключения отложения частиц на стенках непосредственно перед сепарационной щелью обычно создают разрежение в бункере сбора частиц, что позволяет «сдуть» мелкие частицы в бункер. Это может быть сделано разными способами, например, с помощью специального вентилятора отсоса газа в атмосферу, как это делается в системах очистки воздуха на газоперекачивающих аппаратах. В нашем случае это выполнено с помощью специальной трубы рециркуляции, отсасывающей газовую смесь из бункера в область максимального разрежения в центре аксиального завихрителя.

Отметим, что рециркуляция в приосевую зону завихрителя приводит к существенному изменению структуры течения в циклоне (рисунок 11). При отсутствии рециркуляции (рисунок 11, б) за завихрителем возникает зона обратных токов (ЗОТ) с образованием продольной вихревой структуры. Вдув газа в осевую зону завихрителя приводит к исключению этой зоны.

В Таблице 4 приведены результаты расчета эффективности очистки циклона для случая с рециркуляцией и без нее.

Для мелких частиц рециркуляция приводит к увеличению эффективности очистки. Для крупных частиц с $d_{43} = 128$ мкм влияние рециркуляции незначительно. В последнем случае частицы, по-видимому, по инерции пролетают в бункер и дополнительный отсос через сепарационную щель не требуется. Расчеты показали также, что давление в бункере при рециркуляции уменьшилось на (4,7...14,3)% относительно схемы без рециркуляции газа, в зависимости от величины рециркуляции.

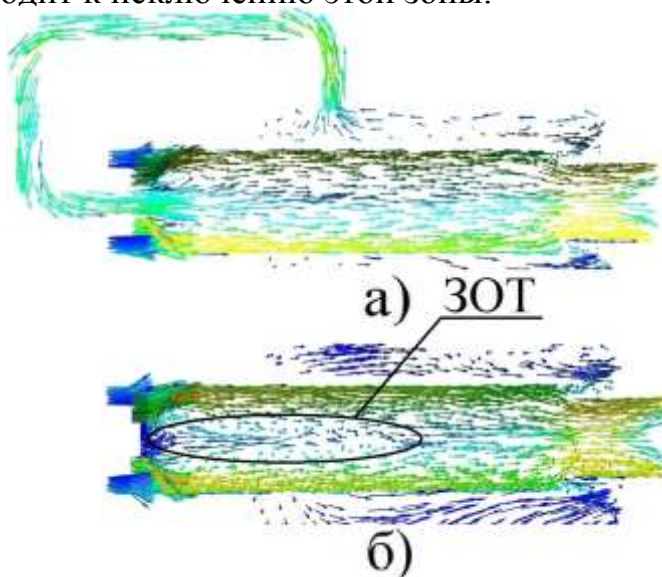


Рисунок 11. Векторы скорости в проточной части циклона: а) с рециркуляцией, б) без рециркуляции
(4,7...14,3)% относительно схемы без рециркуляции.

Таблица 4 – Эффективность очистки циклона с рециркуляцией и без нее (при $G_1/G_0 \approx 9\%$)

		$d_{43} = 128$ мкм	$d_{43} = 9$ мкм
$\eta, \%$	Без рециркуляции	97,96	70,3
	С рециркуляцией	98,15	75,5

Из рисунка 12 видно, что величина рециркуляции в диапазоне от $\approx 4\%$ до $\approx 16\%$ практически не влияет на эффективность очистки исследуемого прямоточного циклона.

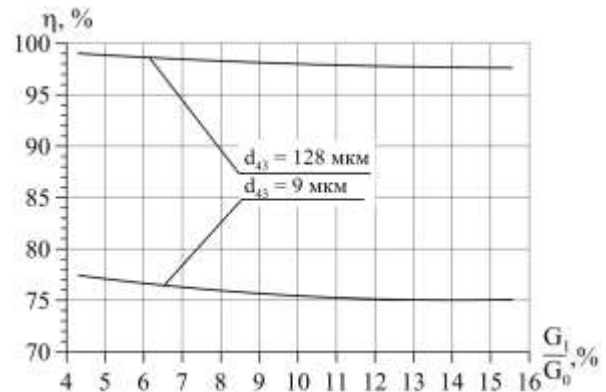


Рисунок 12. Зависимость эффективности очистки от величины рециркуляции газа

Исследование структуры течения в прямоточном циклоне. На Рисунке 13 представлены расчетные значения продольных профилей избыточного статического давления $\Delta P = P - P_n$, где P – давление в текущем сечении \bar{x} , P_n – давление на входе в завихритель. Видно, что наибольший перепад статического давления ΔP происходит на завихрителе. Так, на стенке он равен ~ 450 Па, что соответствует половине полного перепада давления на циклоне - $\Delta P \approx 800$ Па, а на оси практически совпадает с ним. По всей длине циклона величина давления у стенки и на оси мало изменяется за исключением области непосредственно перед патрубком отвода очищенного газа $\bar{x} = (2,9 \dots 3,5)$. Эти изменения связаны с влиянием разрежения перед этим патрубком вследствие отсоса газа.



Рисунок 13. Продольные профили избыточного статического давления на оси и у стенки вихревой трубы

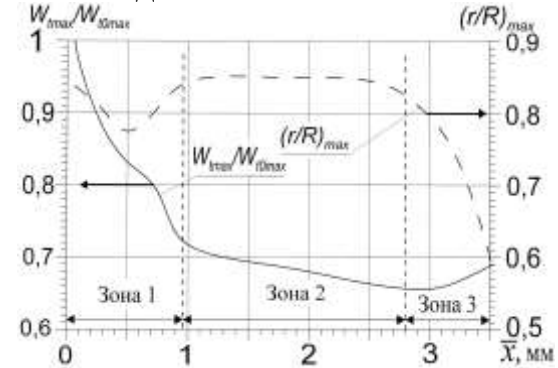


Рисунок 14. Изменения максимальной тангенциальной скорости и пространственное положение её максимума

На рисунке 14 показано изменение максимальной тангенциальной скорости и пространственное положение её максимума по длине циклона. W_{tmax} – максимум тангенциальной скорости в текущем сечении, W_{t0max} – максимум тангенциальной скорости в начальном сечении, R – радиус вихревой трубы, r – радиус положения максимума тангенциальной скорости в текущем сечении.

Можно условно выделить три зоны течения смеси в прямоточном циклоне: 1, 2, 3. В зоне 1 структура и параметры течения существенно зависят от завихрителя. В зоне 2, течение близко к закрученному движению потока в цилиндрической трубе. В диссертации дается сравнение полученных результатов с параметрами потока в трубе. Параметры в зоне 3 определяются отсосом газа через патрубок отвода очищенного газа. Аналогичное разделение за зоны было получено А.А. Халатовым при исследовании закрученного однофазного течения в круглой трубе.

На рисунке 15 а) приведены расчетные профили тангенциальной скорости частиц и газа по тракту циклона.

Видно существенное отставание частиц от газа. Величина отставания зависит от среднемассового размера частиц. Более крупные частицы отстают больше, чем мелкие. Кроме того, стоит отметить, что перед патрубком отвода очищенного газа, газ начинает ускоряться, а частицы, в силу своей инерционности – еще больше отстают.

По мере движения частиц по тракту циклона скорости крупных и мелких частиц практически выравниваются.

Расчет двухфазного течения в циклоне показал, что предотвращение газового потока не оказывает существенного влияния на движение частиц (рисунок 15 б).

Определение минимального размера частиц, который способен уловить сепаратор. В технической литературе при рассмотрении данного вопроса чаще всего предполагается, что все частицы с диаметрами меньше некоторого значения не могут быть отсепарированы циклоном и уносятся вместе с очищенным газом. На наш взгляд, решение данной задачи не так однозначно.

Нами были проведены расчеты траекторий отдельных частиц различных размеров, в зависимости от места их входа в завихритель. На рисунке 16 а), б) представлены траектории движения частиц диаметром 1 мкм в проточной части циклона. Для первого случая место входа в завихритель находится у периферии вихревой трубы. В этом случае частица движется у стенки и попадает в бункер сбора примеси. Для случая б) – местом

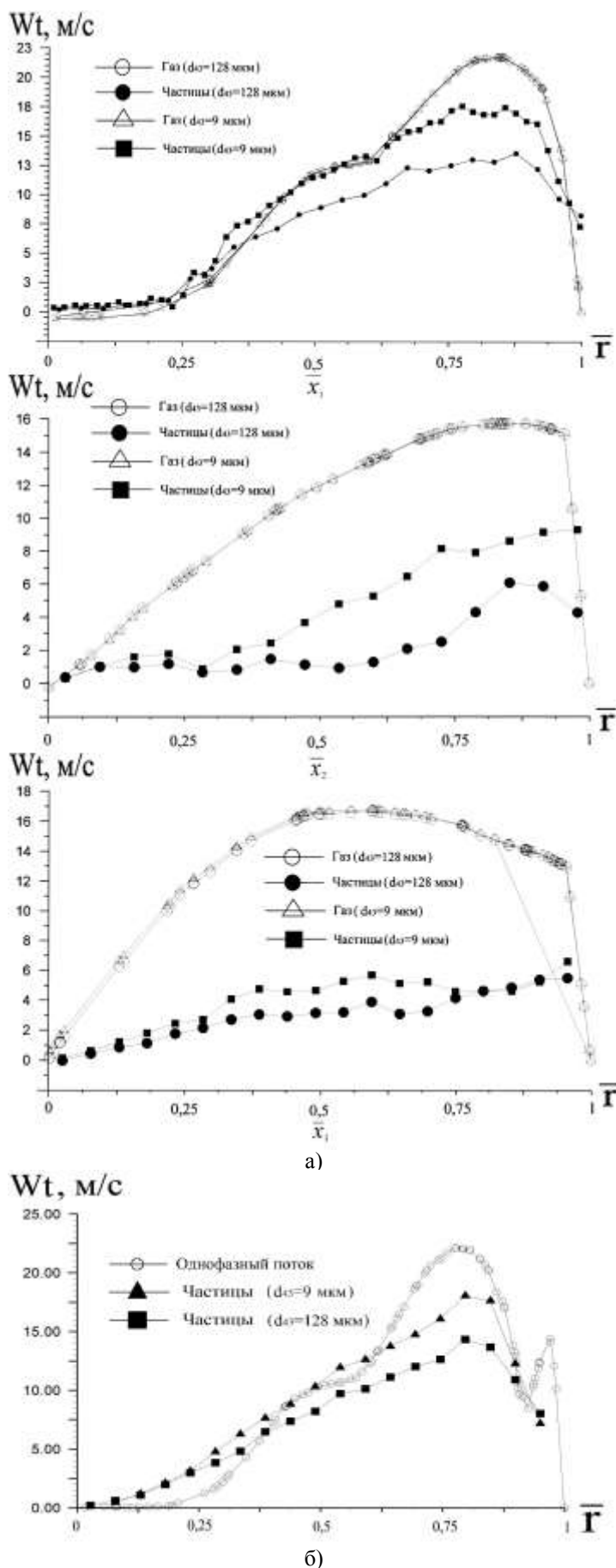


Рисунок 15. Расчетные профили тангенциальной скорости частиц и газа:

а) $\bar{x}_1 = 0,0625$, $\bar{x}_2 = 1,8$, $\bar{x}_3 = 3,5$; б) $\bar{x} = 0,05$

входа в завихритель является приосевая зона: частица движется по спирали вдоль оси циклона и попадает в патрубок очищенного газа.

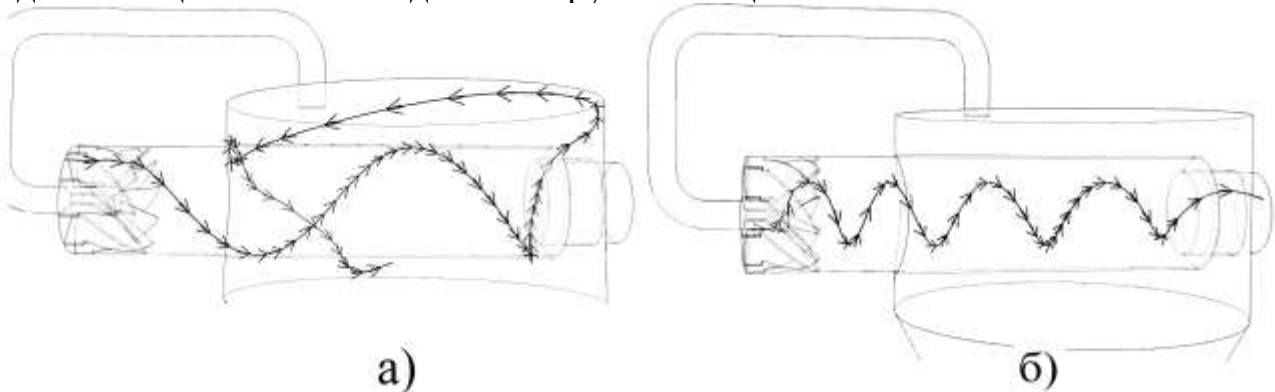


Рисунок 16. Траектория движения частицы диаметром 1 мкм:
а) отсепарированная частица, б) неотсепарированная частица

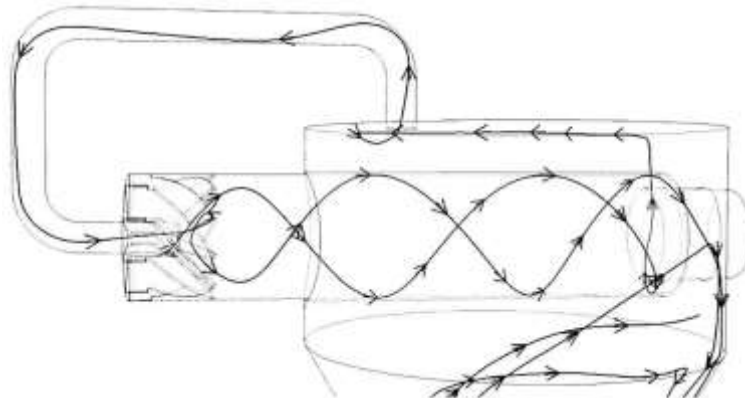


Рисунок 17. Траектория движения частицы диаметром 12 мкм

Таким образом, циклон способен уловить даже самые мелкие частицы, но их сепарация зависит от места их входа в завихритель. Так, если вход осуществляется у периферии вихревой трубы, то частица попадет в бункер сбора примеси. В случае, когда самые мелкие частицы попадают в приосевую зону завихрителя – они выходят из циклона через патрубок очищенного газа.

Начиная с диаметров ~ 12 мкм масса частиц и их размер оказываются достаточными, чтобы исследуемый циклон смог их отделить от газа независимо от радиального расположения на входе.

Была замечена особенность выбранной схемы прямооточного циклона, а именно вторичный пролет некоторых, уже отсепарированных, частиц через сепаратор, который показан на рисунке 17. Другими словами, частица может быть первоначально отделена от газа и попадет в бункер сбора примеси, а затем из него через рециркуляционную трубу вновь окажется в циклоне, но уже в приосевой зоне на входе.

Влияние степени закрутки на эффективность очистки и гидравлическое сопротивление циклона. Важной характеристикой прямооточного циклона является интенсивность закрутки. Для аксиального завихрителя она определяется углом наклона лопаток к оси циклона – α . В литературе широкое распространение получил интегральный параметр закрутки $\Phi = \frac{M}{K_x R}$, где: M –

момент количества движения закрученного потока; K_x – количество движения вдоль оси вихревой трубы, R – радиус вихревой трубы.

Для определения данного параметра необходимо знать профили аксиальных и тангенциальных скоростей непосредственно за завихрителем. Такие расчетные профили, полученные нами за завихрителем ($\bar{x} \approx 0,06$) для различных углов наклона лопаток $\alpha = 30^\circ$, 45° и 60° показаны на рисунке 18.

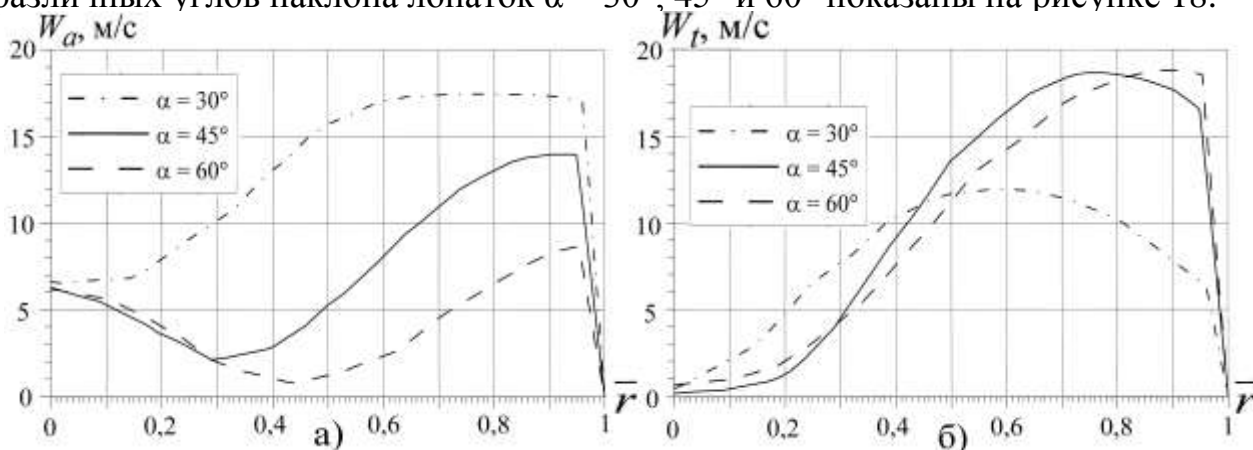


Рисунок 18 Профили скоростей потока по радиусу вихревой трубы, при различных углах наклона лопаток завихрителя: а) аксиальных, б) тангенциальных

При изменении степени закрутки происходит изменение параметров отрыва потока со спинок лопаток завихрителя. С увеличением степени закрутки с $\Phi = 1,14$ ($\alpha = 45^\circ$) до $\Phi = 2,11$ ($\alpha = 60^\circ$) предотрыв перерастает в отрыв потока от спинок лопаток завихрителя. При уменьшении степени закрутки с $\Phi = 1,14$ ($\alpha = 45^\circ$) до $\Phi = 0,41$ ($\alpha = 30^\circ$) величина предотрыва увеличивается, хотя степень закрутки падает. На рисунке 19 показано отношение средней скорости в сечении $\bar{x} \approx 0$ к скорости в точке отрыва потока в зависимости от степени закрутки. Таким образом, оптимальным, с точки зрения снижения образования отрывных течений на лопатках завихрителя, является угол установки лопаток - 45° .

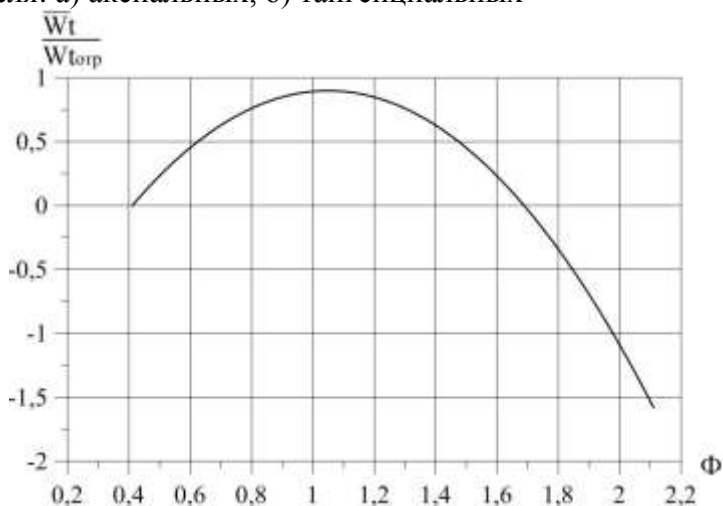


Рисунок 19 – Степень отрыва потока при различных величинах степени закрутки

В Таблице 5 приведены расчетные значения параметра Φ и его влияние на эффективность очистки. Заметим, что при $\Phi > 0,6$ течение считается сильно закрученным, а при $\Phi < 0,3$ - слабозакрученным.

Таблица 5 – Влияние интенсивности закрутки потока на эффективность очистки циклона.

Угол наклона лопаток, α	30°	45°	60°
$\text{tg } \alpha = W_t/W_a$	0,577	1	1,73
Интегральный параметр эффективность закрутки, Φ	0,41	1,14	2,11
η , %, $d_{43} = 128$ мкм	89,3	98,15	99,45
η , %, $d_{43} = 9$ мкм	57,3	75,5	91

В этой же таблице для сравнения приведены данные по другим критериям закрутки, таким, как α и $W_t/W_a = \text{tg } \alpha$, которые обычно используют в инженерной практике.

Расчеты показали, что с увеличением степени закрутки эффективность

очистки циклона растет как для крупных, так и для мелких частиц. Данный факт обусловлен тем, что при повышении угла наклона лопаток тангенциальная скорость увеличивается. Это приводит к усилению центробежного «отброса» частиц к стенкам вихревой трубы. Кроме того, как видно из рисунка 18 положение максимума тангенциальной скорости с увеличением α смещается к стенке вихревой трубы.

Однако, увеличение степени закрутки влечет за собой существенное увеличение гидравлического сопротивления циклона. В Таблице 6 показана зависимость гидравлического сопротивления от угла наклона лопаток при постоянном расходе газа – 0,0518 кг/с.

Таблица 6 – Зависимость гидравлического сопротивления через циклон от степени закрутки.

α	30°	45°	60°
Гидравлическое сопротивление ΔP , Па	171,5	784	2165,8
Коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho U^2}$	3,81	17,4	48,2

Полученные результаты показали, что при $\alpha = 60^\circ$ гидравлическое сопротивление в 12,5 раз больше, чем при $\alpha = 30^\circ$.

Заметим, что при постоянном $\Delta P = 800$ Па и изменении угла наклона лопаток α от 30° до 60° расход через циклон может уменьшиться до 3,5 раз.

Влияние размера вихревой трубы на эффективность очистки. Для определения влияния диаметра и длины были проведены расчеты двухфазного течения в циклонах с диаметрами вихревой трубы 40 мм, 80 мм, 160 мм, имеющие подобные геометрии. Угол наклона лопаток завихрителя во всех случаях составлял 45° . Исходные данные и условия расчета оставались без изменений. В Таблице 7 приведены результаты расчета эффективности очистки для этих трех циклонов.

Таблица 7 – Влияние диаметра вихревой трубы сепаратора на эффективность очистки

Диаметр вихревой трубы, мм	Ø 40	Ø 80	Ø 160
η , %, $d_{4,3} = 9$ мкм	78,7	75,5	71,1
η , %, $d_{4,3} = 128$ мкм	98,8	98,15	99,1

Видно, что с увеличением диаметра вихревой трубы эффективность очистки циклона практически не меняется для частиц со среднемассовым диаметром в распределении, $d_{4,3} = 128$ мкм. Напротив, для частиц со среднемассовым диаметром в распределении, $d_{4,3} = 9$ мкм эффективность очистки падает. Это можно объяснить уменьшением величины центробежного ускорения $\frac{2 \cdot W_\tau^2}{D}$ при увеличении диаметра вихревой трубы.

Влияние плотности газовой фазы на эффективность очистки. В промышленности встречается задача очистки газов, находящихся под высоким давлением. Для исследования влияния давления и плотности газа на эффективность очистки прямооточного циклона были проведены расчеты при $P = 1 \cdot 10^5, 11 \cdot 10^5, 110 \cdot 10^5$ Па. Результаты приведены в Таблице 8.

Таблица 8 – Влияние плотности несущей фазы на эффективность очистки сепаратора

Давление газа, Па	η , %, $d_{4,3} = 9$ мкм	η , %, $d_{4,3} = 128$ мкм
$1 \cdot 10^5$	75,5	98,15
$11 \cdot 10^5$	72,5	99,15
$110 \cdot 10^5$	45,5	99

Увеличение давления газа, а, следовательно, его плотности сильно сказывается на эффективности очистки мелких частиц и практически не влияет

на эффективность очистки крупных. Это, на наш взгляд, может быть связано с тем, что с увеличением давления газа снижается разность плотностей основной фазы и частиц примеси, а как известно прямоточные циклоны основаны на инерционном принципе разделения фаз с различными плотностями. Для крупных же частиц инерционная сила продолжает поддерживаться за счет большей массы.

Влияние разности скоростей частиц и газа на входе в циклон.

Практический интерес представляет влияние разности скоростей частиц и газа на входе в завихритель на эффективность очистки циклона. Для исследования этого вопроса задавалось отставание скорости частиц от газа на 50% и 25 %. Оказалось, что данный факт практически не влияет на эффективность очистки прямоточного циклона, т.к. время пребывания частиц в завихрителе данной конструкции, по-видимому, достаточно для приобретения ими необходимой скорости. Результаты представлены в Таблице 9.

Таблица 9 – Влияние отставания частиц примеси от газа на входе в завихритель

Отставание, %	η , %, $d_{4,3} = 9$ мкм	η , %, $d_{4,3} = 128$ мкм
0	75,5	98,15
25	76,5	99,5
50	75	99,4

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что для сильнозакрученных течений в трубе для расчета осредненных полей скоростей рассмотренные модели турбулентности дают приблизительно одинаковые результаты. Для расчета турбулентной структуры наиболее приемлемой представляется модель турбулентности RNG;

2. Получены новые данные о структуре двухфазного течения в прямоточном циклоне:

- положение максимума тангенциальной и осевой скоростей;
- обнаружен предотрыв газового потока от спинок лопаток завихрителя, однако он никак не повлиял на движение твердых частиц;
- показано отставание по скорости частиц различных размеров и формы от газа по мере движения по тракту прямоточного циклона;

3. Установлено существенное влияние формы частиц на эффективность очистки, которое наиболее проявляется для частиц малых размеров;

4. На основе расчетов и экспериментов показана целесообразность применения прямоточного циклона по схеме с рециркуляцией газа из бункера в приосевую зону завихрителя, при этом эффективность очистки слабо зависит от количества рециркулируемого газа в диапазоне от $\approx 4\%$ до 16% ;

5. Показано влияние на основные параметры прямоточного циклона, а именно эффективность очистки (η) и гидравлическое сопротивление (ζ) таких факторов как: геометрические размеры циклона, степень закрутки потока, давление газа, расход смеси и концентрация частиц, а также отставание по скорости частиц от газа на входе в завихритель.

6. Предложена методика определения наименьшего диаметра частиц, который способен отделить прямоточный циклон. Установлено, что сепарация единичной частицы зависит от ее радиальной координаты на входе в завихритель.

СПИСОК ТРУДОВ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Буров А.С. Численное и экспериментальное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне (часть I) / Буров А.С., Глебов Г.А. // «Труды Академэнерго». Казань. 2015, № 4, с 22 – 35.

2. Буров А.С. Численное и экспериментальное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне (часть II) / Буров А.С., Глебов Г.А. // «Труды Академэнерго». Казань. 2016, № 1, с 7-19.

Материалы конференций:

3. Буров А.С. Исследование центробежного прямоточного сепаратора для отделения жидкой и твердой фазы от газа / Буров А.С., Хазбулатов А.И. // Материалы III Международной научно-практической конференции /17-19 сентября 2008г./ Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения (ИТМ-2008). Казань, 2008 – С. 49-53;

4. Буров А.С. Моделирование течения в центробежном прямоточном сепараторе для отделения жидких и твердых частиц от газа / Буров А.С., Глебов Г.А. // Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции /12 – 14 мая 2009 г./ Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий / Казанское высшее военное командное училище./ Казань, 2009. – Ч. 2. – С. 120-122.

5. Буров А.С. Использование прямоточно-центробежного сепаратора в устройствах утилизации продуктов сгорания РДТТ / Глебов Г.А., Буров А.С. // Материалы XXXXII Всероссийского симпозиума / 18-20 декабря 2012 г. / Механика и процессы управления / Межрегиональный совет по науке и технологиям. / Миасс, Челябинской обл., 2012 г. – Т. 4. – С. 91-99.

6. Буров А.С. Влияние формы и концентрации частиц на эффективность очистки прямоточно-центробежного сепаратора / Буров А.С. // Материалы XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева / 10-12 июня 2014 г. / Наука и технологии / Межрегиональный совет по науке и технологиям. / Миасс, Челябинской обл., 2014 г. – Т. 2. – С. 69-77.

Глава монографии:

7. Буров А.С. К вопросу об использовании прямоточно-центробежного сепаратора в устройствах утилизации продуктов сгорания РДТТ / Буров А.С., Глебов Г.А. // Коллективная монография Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий «Наука и технологии» / Межрегиональный совет по науке и технологиям. / Миасс, Челябинской обл., 2014 г. – Глава 8. – С. 167-193.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл.печ.л. 0,93 Тираж 110. Заказ Д37.

Полиграфический участок издательства КНИТУ-КАИ.
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10